

**A. В. ГРАБОВСЬКИЙ, В. В. ТРЕТЯК, І. О. ВОЛОШИНА, М. М. ТКАЧУК, С. І. МАРУСЕНКО,  
В. І. СЕРИКОВ, І. П. ГРЕЧКА, Г. В. ТКАЧУК, А. О. ЗАРУБІНА, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, О. В. СТАХОВСЬКИЙ**

### **РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТУ ГІДРОПЕРЕДАЧІ ТАНКОВОЇ ТРАНСМІСІЇ**

Задля обґрунтування прогресивних технічних рішень радіальних гідрооб'ємних передач необхідно здійснювати дослідження напружено-деформованого стану їхніх найбільш відповідальних та навантажених елементів. Зокрема, викликає інтерес визначення раціональних параметрів блоку циліндрів, який підлягає дії значного тиску робочої рідини. Це призводить до формування напружено-деформованого стану із високим рівнем напружень та пружних переміщень. Вони можуть бути небезпечними із точки зору міцності, жорсткості та працездатності гідрооб'ємної передачі у цілому. Для здійснення чисельних досліджень напружено-деформованого стану блоку циліндрів гідрооб'ємної передачі на етапі проектування розробляються скінченно-елементні моделі із варійованими параметрами. Разом із тим на цьому етапі досліджень бажано мати у розпорядженні верифіковану чисельну модель. Задля цього у роботі описані розрахунково-експериментальні дослідження макету циклічної частини блоку циліндрів гідрооб'ємної передачі. З одного боку, ці дослідження виконані за допомогою експериментального методу голографічної інтерферометрії. З іншого боку, здійснені розрахунки із використанням методу скінченних елементів. У ході порівняння отриманих результатів визначені параметри скінченно-елементних моделей, які забезпечують високу точність розрахунку напружено-деформованого стану блоку циліндрів гідрооб'ємних передач.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан; гідрооб'ємна передача; метод скінченних елементів; блок циліндрів

**A. В. ГРАБОВСКИЙ, В. В. ТРЕТЯК, И. А. ВОЛОШИНА, Н. Н. ТКАЧУК, С. И. МАРУСЕНКО,  
В. И. СЕРИКОВ, И. П. ГРЕЧКА, А. В. ТКАЧУК, А. А. ЗАРУБИНА, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ, О. В. СТАХОВСКИЙ**

### **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА ГИДРОПЕРЕДАЧИ ТАНКОВОЙ ТРАНСМИССИИ**

Для обоснования прогрессивных технических решений радиальных гидрообъемных передач необходимо проводить исследования напряженно-деформированного состояния наиболее ответственных и нагруженных элементов. В частности, вызывает интерес определение рациональных параметров блока цилиндров, подверженного действию значительного давления рабочей жидкости. Это приводит к формированию напряженно-деформированного состояния с высоким уровнем напряжений и упругих перемещений. Они могут быть опасны с точки зрения прочности, жесткости и работоспособности гидрообъемной передачи в целом. Для осуществления многочисленных исследований напряженно-деформированного состояния блока цилиндров гидрообъемной передачи на этапе проектирования разрабатываются конечно-элементные модели с варьируемыми параметрами. Вместе с тем, на этом этапе исследований желательно располагать верифицированной численной моделью. С этой целью в работе описаны расчетно-экспериментальные исследования макета циклической части блока цилиндров гидрообъемной передачи. С одной стороны, эти исследования выполнены с помощью экспериментального метода голографической интерферометрии. С другой стороны, проведены расчеты с применением метода конечных элементов. В ходе сравнения полученных результатов определены параметры конечно-элементных моделей, обеспечивающих высокую точность расчета напряженно-деформированного состояния блока цилиндров гидрообъемных передач.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние; гидрообъемная передача; метод конечных элементов; блок цилиндров

**A. GRABOVSKIY, V. TRETYAK, I. VOLOSHYNA, M. M. TKACHUK, S. MARUSENKO,  
V. SIERYKOV, I. HRECHKA, G. TKACHUK, A. ZARUBINA, A. VASYLIEV, O. STAKHOVSKIY**

### **CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF TANK HYDRAULIC TRANSMISSION MOCK-UP**

In order to substantiate the advanced technical solutions of radial hydrovolume transmissions, it is necessary to study the stress-strain state of their most responsible and loaded elements. In particular, it is of interest to determine the rational parameters of cylinder block, which is subject to significant pressure of working fluid. This leads to the formation of a stress-strain state with a high level of stresses and elastic displacements. They can be dangerous in terms of strength, rigidity and performance of the hydraulic transmission in general. To carry out numerical studies of the stress-strain state of cylinder block of hydrovolume transmission at the design stage, finite element models with varied parameters are developed. However, at this stage of research, it is desirable to have a verified numerical model. For this purpose, the paper describes the computational and experimental studies of the layout of the cyclic part of the hydrovolume transmission cylinder block. On the one hand, these studies were performed using the experimental method of holographic interferometry. On the other hand, calculations were performed using the finite element method. In the course of comparison of the received results, the finite element model parameters are determined which provide high accuracy of the stress-strain state calculation of hydrovolume transmissions cylinder block.

**Keywords:** stress-strain state; hydrovolume transmission; finite element method; cylinder block

**Вступ.** У світовому бронетанкобудуванні склалася низка домінуючих тенденцій. Однією з них є зростання питомої потужності силових агрегатів, тобто відношення потужності основного двигуна до повної бойової маси. Для сучасних зарубіжних бойових машин важкої категорії за масою (Leopard, Abrams, Leclerc) вказаний показник досягається застосуванням двигунів різного типу (дизельні чотири тактні, газотурбінні тощо), проте високої потужності (до 1500 к. с.). Разом із тим вітчизняні танки (БМ «Булат», «Оплот»), маючи меншу установлену потужність двигуна (1000–1200 к. с.),

але ще більш малу масу, мають співставні зі світовим рівнем її питомі показники.

Це досягається, у першу чергу, шляхом застосування високоефективних двигунів із протилежним рухом поршнів, що мають високу питому потужність, частоту обертання і малі габарити. У той же час світові тенденції, які втілю-

© А. В. Грабовський, В. В. Третяк, І. О. Волошина, М. М. Ткачук, С. І. Марусенко, В. І. Сериков, І. П. Гречка, Г. В. Ткачук, А. О. Зарубіна, А. Ю. Васильєв, О. В. Стаховський, 2022

ються у вимогах потенційних зарубіжних та вітчизняних замовників бронетанкової техніки, потребують удосконалення трансмісій. Зокрема, одним із перспективних рішень у цьому напрямку є застосування гідропередач, а з урахуванням обмежених габаритів моторно-трансмісійного відділення – переважно радіальних, у яких розміри можуть бути значно меншими, ніж у аналогічних аксіальних передач.

Однак, таке рішення спричиняє різке зростання діючих експлуатаційних навантажень, оскільки потужність, що передається від танкових дизелів, значна. При цьому всі можливості традиційних розрахункових методик, що спираються на традиційні розрахункові моделі напружено-деформованого стану (НДС) елементів гідропередач, вичерпані, а їх подальше використання може призвести до грубих помилок у проєктних рішеннях.

Таким чином, сформувалося протиріччя між прагненням забезпечити зростання тактико-технічних характеристик бойових машин за рахунок застосування гідрооб'ємних передач (ГОП) та обмеженими можливостями сучасних розрахункових засобів. У результаті виникає актуальне наукове завдання – розробка підходів до розрахунково-експериментального обґрунтування параметрів чисельних моделей для аналізу напружено-деформованого стану елементів гідрооб'ємних передач, що забезпечують точність та оперативність багатоваріантних розрахунків цих машин.

Це завдання визначило напрямки досліджень, описаних у роботі, на продовження та узагальнення результатів досліджень, викладаних у [1–4].

**Аналіз методів дослідження напружено-деформованого стану елементів гідропередач.** У роботі проблеми забезпечення міцності елементів гідропередач розглянуто на прикладі блоків циліндрів (БЦ), які поєднують у собі всі характерні конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори, що діють у сукупності на інші елементи, які знаходяться під дією гідродинамічних навантажень.

Сучасні гідравлічні машини знаходять широке застосування у заново проєктованих транспортних засобах для забезпечення підвищення їх тактико-технічних характеристик. При цьому на етапі проєктування та технологічної підготовки виробництва цих гідромашин потрібно у стислий термін вирішувати завдання оптимального вибору конструктивних схем та параметрів найбільш навантажених та відповідальних елементів [1]. Це особливо актуально для бойових машин, у яких режими експлуатації дуже широкі та важкі. Однак у розпорядженні проєктувальників на теперішній час відсутні повною мірою відпрацьовані нормативні документи, рекомендації та засоби розв'язання задач синтезу проєктованих машин за критеріями міцності, жорсткості, потужності та довговічності, що пояснюється новизною та складністю конструкції та інтенсивним характером діючих навантажень. У зв'язку з цим необхідно розглянути висвітлення питань проєктування, моделювання кінематики, динаміки та напружено-деформованого

стану гідромашин у науковій літературі.

У роботі міститься такий аналіз, здійснений на прикладі радіальної гідрооб'ємної передачі ГОП-900 [5], створеної у ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова».

Гідрооб'ємні передачі (аксіальні та радіальні), а також інші типи гідромашин (гідродинамічні, гідротрансформатори, гідромуфти тощо) мають широке застосування у машинах різних типів, у тому числі – у бойових машинах важкої категорії за масою [6]. Як відзначається у [6–11], «для сучасного машинобудування характерна тенденція до інтенсифікації навантажень на елементи гідравлічних машин, причому сфера застосування цих машин постійно розширюється. З урахуванням посилення вимог до технічних рішень гідравлічних машин, традиційні методики розрахунку виходять за межі свого застосування. Відповідно, необхідна розробка нових, удосконалених підходів, моделей та методів дослідження процесів та станів елементів гідромеханічних передач, які враховують не окремі фактори, а їх набори, причому у взаємодії та взаємовпливі. Універсальні CAD/CAM/CAE системи мають потужні засоби аналізу процесів і станів, у тому числі – і в елементах гідромеханічних передач, проте в них відсутні механізми формування комплексних розрахункових моделей, зокрема, у предметній області розрахунку (аналізу та синтезу елементів гідромеханічних передач із урахуванням всього комплексу фізико-механічних процесів та станів, структури, параметрів та вимог до технічних характеристик). Як вихід із цієї ситуації пропонується створення інтегрованих програмно-модельних комплексів, що поєднують, з одного боку, універсальне програмне забезпечення, а, з іншого, – спеціалізовані модулі та параметричні моделі. Це дасть можливість поширити можливості потужних універсальних систем моделювання на предметну область супроводу розробок, виготовлення та експлуатації гідромеханічних передач із високими технічними характеристиками. Для вирішення завдань синтезу (обґрунтування структури та параметрів гідромеханічних передач) застосування традиційних спрощених математичних та чисельних моделей може призводити до суттєвих похибок у розрахунках, а, відповідно, – і до помилок під час прийняття проєктних рішень для сучасних гідромеханічних передач. Відповідно, потрібна інтеграція в алгоритми синтезу більш адекватних комплексних моделей процесів та станів у об'єктах досліджень» [6].

Для моделювання робочих процесів у гідромашинах та НДС їхніх елементів широко застосовуються методи скінченних об'ємів (МСО), скінченних різниць (МСР), скінченних елементів (МСЕ) та інші [12–19].

Так, робота [12] спрямована на дослідження динаміки ротора багатоступінчастого відцентрового двигуна машин на шарикопідшипниках за допомогою комп'ютерних програм «Критичні частоти ротора» та «Вимушені коливання ротора», в яких реалізована математична модель на основі використання балкових скінченних елементів. Вільні

та вимушені коливання ротора багатоступінчастого відцентрового масляного насоса визначаються з урахуванням аналітичної залежності жорсткості підшипника від частоти обертання ротора.

У роботі [13] для мехатронних систем із гідравлічним приводом активних робочих органів самохідної техніки використовуються різні типи гідравлічних машин, але особлива увага приділяється орбітальним та планетарним гідромоторам. Під планетарними гідромоторами маються на увазі гідромашини, що конструктивно виконані та працюють за принципом планетарного редуктора. Кривошипом у цій гідромашині є гідравлічне поле, що обертається та формується розподільчою системою планетарного гідромотора. Розподільча система аналізованого гідромотора є одним із основних механізмів, що визначають стійку роботу планетарного гідромотора. Тому дослідження, пов'язані з розробкою та обґрунтуванням геометричних параметрів елементів розподільних систем, дають можливість значно поліпшити вихідні характеристики планетарних гідромашин. У результаті здійснених досліджень розроблено розрахункові схеми, математичний апарат та алгоритм розрахунку, які дають можливість обґрунтувати кутове розташування робочих та розвантажувальних вікон рухомого розподільника. Визначено вплив зміни розташування вікон на вихідні характеристики планетарного гідромотора. Обґрунтовано кутове розташування робочих та розвантажувальних вікон рухомого розподільника розподільної системи планетарного гідромотора. Розроблено методику усунення розподільних вікон рухомого розподільника, що дає можливість знизити коливання потоку робочої рідини, і як наслідок, поліпшити вихідні характеристики планетарного гідромотора.

У роботі [14] дослідження було присвячено вивченню функціональних характеристик мехатронної системи з гідравлічним приводом на шасі. Система містила аксіально-поршневий регульований насос і два мехатронні модулі (ступіці колеса) з орбітальними гідравлічними двигунами. Таке компонування дало змогу забезпечити швидкість самохідної машини у необхідному діапазоні. Експериментальні дослідження продемонстрували рекомендовані режими роботи насоса.

У роботі [15] розглядається система, в якій використовують вікна, що були виконані у формі заглиблення. Було вивчено робочі процеси всередині такої системи розподілу. Отримані результати було використано для розробки математичної моделі. Це дало можливість визначити взаємозв'язок між геометричними параметрами розподільчої системи та вихідними характеристиками орбітальної гідравлічної машини.

У роботі [16] працездатність розподільчої системи планетарного гідромотора зумовлена технологічністю виготовлення його елементів, зокрема розподільчих вікон. Для вирішення проблеми підвищення технологічності виготовлення

елементів розподільчої системи планетарного гідромотора обґрунтовано форму вікон розподільника та золотника. Розроблено розрахункову схему, математичний апарат та алгоритм розрахунку, що дають можливість досліджувати вплив зміни геометричних параметрів розподільчої системи на пропускну здатність планетарного гідромотора з вікнами, виконаними у вигляді кола. Обґрунтовано вихідні дані та початкові умови для моделювання роботи розподільчої системи планетарного гідромотора з різними кінематичними схемами. Досліджено зміну пропускну спроможності (площі прохідного перерізу) від кінематичної схеми розподільчої системи. Встановлено, що зі збільшенням кількості робочих вікон розподільника площа прохідного перерізу розподільчої системи зменшується. Амплітуда коливань площі прохідного перерізу при цьому також зменшується.

У роботі [17] при проектуванні мехатронних систем велика увага приділяється забезпеченню заданих вихідних характеристик виконавчих механізмів проектованої системи. Розроблено методику проектування гідравлічних мехатронних систем з елементами багатокритеріальної оптимізації, що дає можливість проектувати мехатронну систему із заданими вихідними характеристиками. Обґрунтовано параметри оптимізації елементів керування мехатронною системою з гідравлічним приводом активних робочих органів самохідної техніки. У результаті досліджень встановлено оптимальні параметри налаштування запобіжного клапана мехатронної системи.

У роботі [18] описано конструкцію аксіально-поршневого насоса з перекидною пластиною та теоретичні моделі, що описують модуль об'ємної пружності аерованих і неаерованих рідин. Визначено об'єм мертвого простору та розглянуто вплив цього об'єму та стисливості рідини на об'ємну ефективність насоса. Для зменшення об'єму мертвого простору для малих кутів повороту пластини перекоосу пропонується зміщення осі обертання пластини перекоосу. Наведено прототип конструкції насоса зі зміщеною віссю обертання перекидної пластини із двома напрямками подачі, в якій зміна продуктивності здійснюється за допомогою клапанного механізму слідування. Наведено порівняльні результати для насоса зі зміщеною та незміщеною віссю обертання пластини перекоосу, які підтверджують, що зміщення осі обертання пластини перекоосу спричиняє підвищення об'ємної ефективності, що є очевидним для нагнітання високого тиску та малих кутів перекоосу. Визначені характеристики порівняли з математичною моделлю з урахуванням стисливості рідини в об'ємі мертвого простору та отримали задовільну узгодженість.

У роботі [19] дослідження дали можливість виявити реакції системи циліндрів із живильними лініями та клапанами регулювання потоку на змінні зовнішні динамічні збудження. Здійснені порівняльні випробування систем динамічного

реагування із використанням класичного циліндра та нової конструкції системи гідравлічного живлення.

Роботи [20–22] містять опис методів моделювання процесів, станів і характеристик елементів конструкцій. Зокрема, найбільш потужним є метод скінчених елементів [22].

Таким чином, можна погодитися із висновками про те, що для аналізу НДС елементів гідропередач найбільше застосування має МСЕ. Разом із тим, вузьким місцем при його застосуванні є невизначеність із точністю чисельного моделювання НДС елементів гідропередач, яку можна оцінити, наприклад, на основі розрахунково-експериментальних досліджень. Цей напрямок

досліджень продовжено на розвиток та узагальнення результатів робіт [1–4] у цій статті.

Мета роботи – розрахунково-експериментальне дослідження точності скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану елементів радіальних передач на прикладі блоку циліндрів гідропередачі ГОП-900.

**Загальний підхід до дослідження напружено-деформованого стану елементів гідропередач.** Елементи гідропередач підлягають дії багатокомпонентних, інтенсивних та різноманітних навантажень. Зокрема, це дія тиску робочої рідини у циліндрах гідромотора (рис. 1, 2) та відцентрові сили від обертання блоку циліндрів (рис. 2).

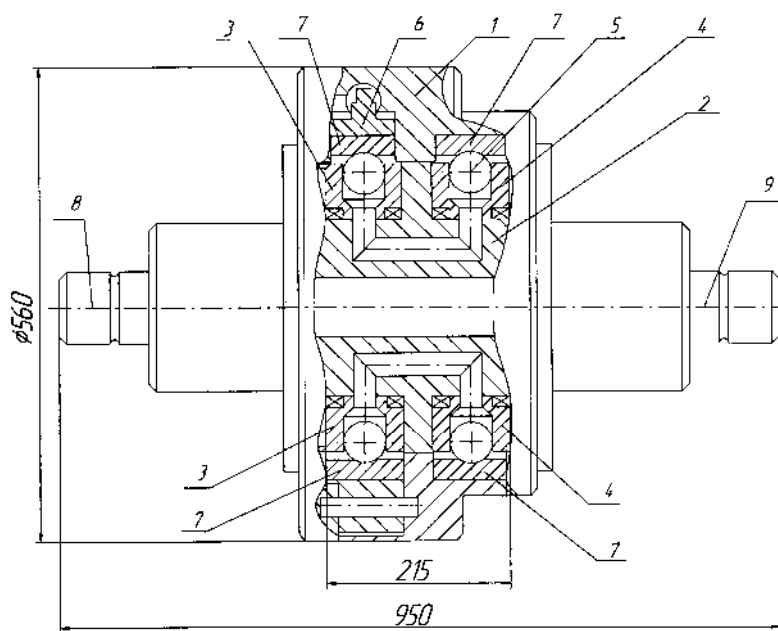


Рисунок 1 – Гідропередача ГОП-900 із кульковими поршнями [3]:

- 1 – корпус; 2 – блок цапфених розподільників; 3 – блок циліндрів насоса; 4 – блок циліндрів гідромотора;  
5 – кулька-поршень; 6 – статор насоса; 7 – обойми (реактивні кільця) насоса та гідромотора;  
8, 9 – вхідний та вихідний вали гідропередачі

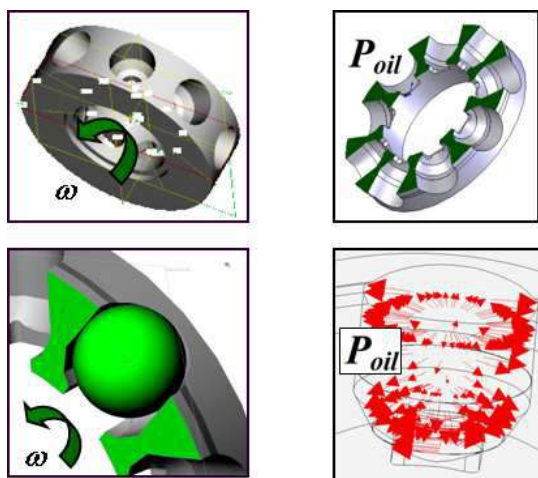


Рисунок 2 – Навантаження від тиску оливи та кутової швидкості обертання

При цьому висота верхньої зони частини кожного циліндра БЦ  $\delta$  є функцією кута повороту  $\gamma$  (рис. 3), а відцентрові сили визначається кутовою

швидкістю обертання  $\omega = \dot{\gamma}$ .

Таким чином, якщо перейти до скінченно-елементного формулювання задачі про НДС БЦ гідрооб'ємної передачі ГОП-900, то у найпростішому випадку маємо систему рівнянь [22]

$$K \cdot q = f, \quad (1)$$

де  $K$  – матриця жорсткості досліджуваної конструкції,

$q$  – вектор шуканих вузлових параметрів,

$f$  – вектор вузлових навантажень.

Тут справедливі такі подання:

$$K = K(p), \quad f = f_1(p) \cdot P_{oil} \cdot \varphi(\gamma) + f_2(p) \cdot \omega^2, \quad (2)$$

де  $p$  – масив параметрів, які визначають форму та властивості матеріалів БЦ та інших елементів передачі ГОП-900,

$P_{oil}$  – тиск робочої рідини на поверхні  $S\sigma$  (див. рис. 3),

$K(p)$ ,  $f_1(p)$ ,  $f_2(p)$  – параметричні залежності компонент матриці жорсткості та компонент векторів навантажень від  $p$ ,

$\varphi(\gamma)$  – функціональна залежність, що описує зміну висоти навантаженої частини циліндрів  $\delta$  від кута  $\gamma$ .

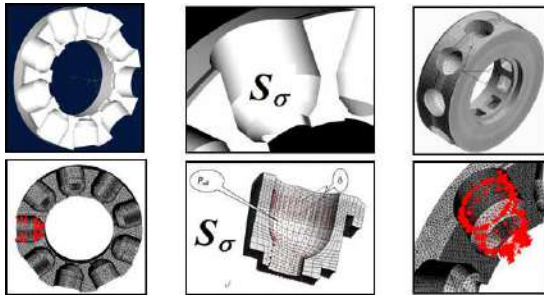


Рисунок 3 – Навантаження від робочого тиску оливи Poil

Таким чином, у найпростішому випадку реалізується двопараметрична залежність НДС від компонент навантаження Poil та  $\gamma(t)$ . Оскільки залежність відцентрових сил від кутової швидкості обертання  $\omega$  є відомою (за параболічною залежністю), то її чисельне моделювання не становить проблем. Більш складним є моделювання компоненти навантаження, породжуваної тиском Poil, оскільки він має складну залежність від інших величин (рис. 4). Тому для розрахунково-експериментального дослідження обрано БЦ гідропередачі ГОП-900 (його циклічну 1/9 частину), яка піддана тільки дії внутрішнього тиску Poil.

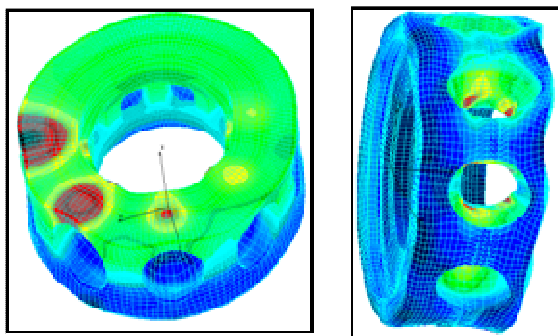


Рисунок 4 – Характерні розподіли повних переміщень (зліва) та еквівалентних (за Мізесом) напружень (справа) у БЦ ГОП-900

**Розрахунково-експериментальне дослідження напружено-деформованого стану гідрооб'ємних передач.** Дослідження здійснювалися на основі попередніх [1–4] та нових результатів.

*Методика та результати експериментальних досліджень.* Як засвідчив аналіз літератури (див. вище), натеper існує велика кількість методів експериментальних досліджень, які можуть бути використані для визначення НДС елементів гідромашин [23–25]. Усі вони мають певні переваги і недоліки, і вибір того чи іншого з них або набору використовуваних методів диктується специфікою об'єкта дослідження або особливістю завдання [1–4].

Для визначення достовірності результатів чисельних досліджень напружено-деформованого стану корпусу гідронасоса ГОП-900 необхідні

експериментальні дослідження. Оскільки метод голографічної інтерферометрії дає можливість отримувати з високою точністю безперервні поля переміщень, то саме він був використаний для експериментального визначення характеру деформування окремого фрагмента корпусу гідронасоса ГОП-900. При цьому виникають завдання:

- вибору певного методу та вимірювальної схеми для фіксації характеру деформування фрагмента корпусу гідронасоса з існуючої на теперішній час великої їх кількості;
- адаптація вимірювальної схеми та алгоритмів обробки інтерференційних картин стосовно конкретного класу об'єктів;
- виготовлення та монтаж елементів вимірювальної схеми із подальшим здійсненням багатоваріантного дослідження;
- визначення достовірності результатів чисельних досліджень.

Натеper при здійсненні експериментальних досліджень методом голографічної інтерферометрії необхідно попередньо аналізувати переваги і недоліки варіантів, методів і схем, алгоритмів і програмного забезпечення.

Для досліджень використана схема запису голограм у зустрічних пучках [1–4, 23–25]. За допомогою схеми, наведеної на рис. 5, можливо одночасно на те саме реєструє середовище записати голограму подвійної експозиції у зустрічних пучках і спекл-фотографію подвійної експозиції, оскільки було виявлено, що при записі голограм у зустрічних пучках на реєструє середовище, накладене на об'єкт, одночасно відбувається запис і спекл-структури. Контролювалися переміщення точок площини, показаної на рис. 6.

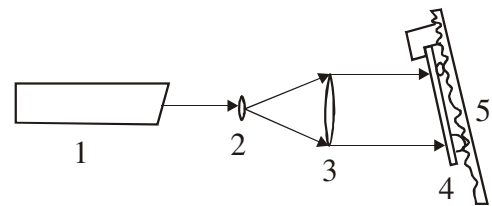


Рисунок 5 – Схема, що поєднує спосіб подвійної експозиції у зустрічних пучках і спекл-інтерферометрію, стосовно плоских об'єктів:

- 1 – лазер; 2 – мікрооб'єкт; 3 – колімуюча лінза; 4 – реєструє середовище; 5 – об'єкт досліджень

Експериментальні роботи здійснювалися на голографічній установці СІН, укомплектованій гелій-неоновим лазером ЛГН-215 (рис. 7). Модель циклічного фрагмента блоку циліндрів виготовлена із плексигласу (модуль пружності  $E = 0,069$  ГПа, коефіцієнт Пуассона = 0,23) у реальному масштабі без відтворення окремих дрібних деталей (рис. 8). Тиск робочого тіла моделювався за допомогою гідронасосу (рис. 9). Сам об'єкт жорстко закріплювався столі СІН-1 за допомогою спеціальних призм (рис. 10).

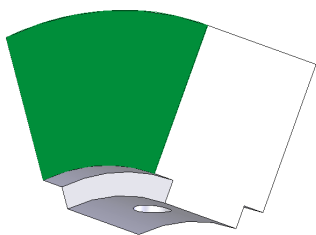


Рисунок 6 – Поверхня моделі фрагмента БЦ ГОП-900, що досліджується

Реструвальне середовище встановлювалося за допомогою спеціальних пристроїв у безпосередній близькості від досліджуваної поверхні. Як параметр, що варіюється, був обраний хід поршня, який вимірювався штангельциркулем (контролювалося віддалення кромки поршня від циліндричної

зовнішньої твірної фрагмента). У табл. 1 наведено варіанти значень  $\xi$ .

Внутрішній тиск підбирався з умови чіткості та наочності картин інтерференційних смуг. Робочі моменти випробувань наведено на рис. 11. Отримані картини інтерференційних смуг наведено на рис. 12. На рис. 13 наведені характерні картини розподілу відносних переміщень  $u = w/w_{\max}$  у локальній криволінійній системі  $O\alpha_1\alpha_2$  ( $\alpha_1 \equiv \text{alpha1}$ ,  $\alpha_2 \equiv \text{alpha2}$ ), показана на рис. 14) із сіткою 11x11.

На рис. 15 наведено розподіли відносних переміщень у перерізі  $O\alpha_1$  для п'яти варіантів (див. табл. 1).



Рисунок 7 – Голографічна установка СІН-1



Рисунок 8 – Модель фрагменту блоку циліндрів гідронасоса ГОП-900



Рисунок 9 – Моделювання тиску робочої рідини в камері циліндра ГОП-900

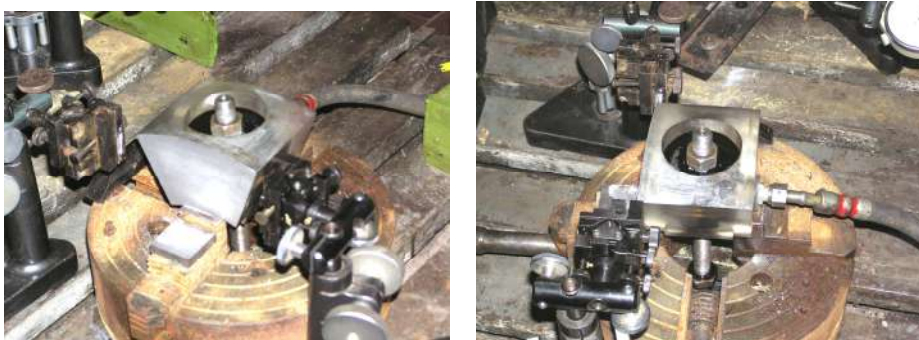


Рисунок 10 – Схема закріплення моделі фрагменту БЦ ГОП-900 на столі СІН-1



Рисунок 11 – Робочі моменти досліджень моделі фрагменту БЦ ГОП-900

Таблиця 1 – Варіанти віддалень  $\xi$

$\xi$ , мм	№ варіанту				
	1	2	3	4	5
	5	10	15	20	25

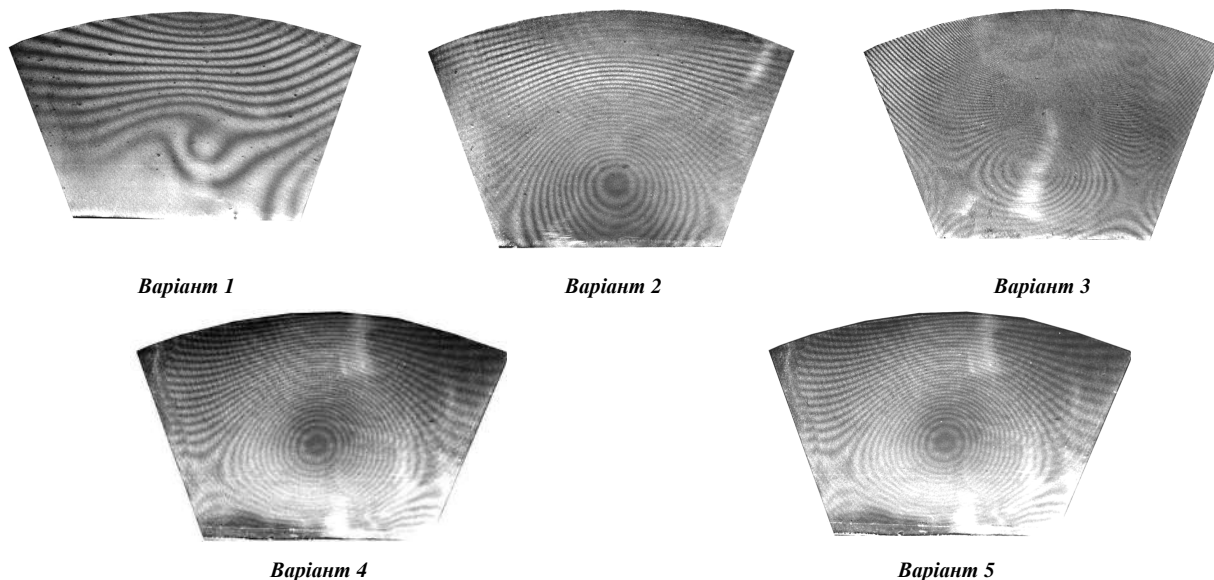


Рисунок 12 – Приклади інтерференційних картин досліджуваної поверхні моделі фрагменту БЦ ГОП-900

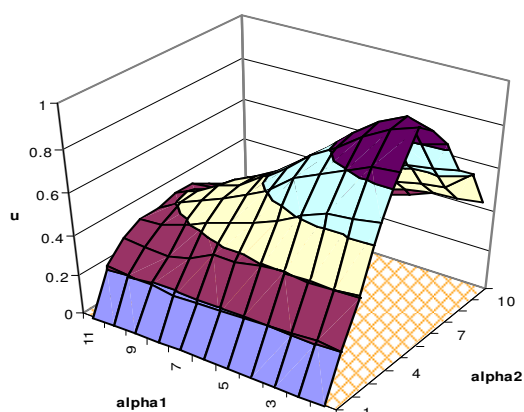


Рисунок 13 – Типова картина розподілу відносних переміщень досліджуваної поверхні моделі фрагменту БЦ ГОП-900

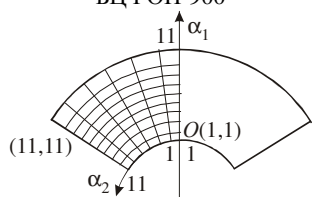


Рисунок 14 – Локальна криволінійна система координат  $O\alpha_1\alpha_2$

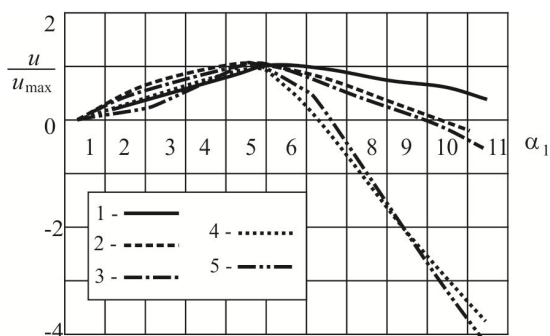


Рисунок 15 – Картини розподілу відносних переміщень у перерізі  $O\alpha_1$  для 5-ти варіантів досліджень моделі фрагмента КГН ГОП -900, отримані експериментально

**Чисельна верифікація експериментальних досліджень.** На рис. 16–18 показані геометрична та скінченно-елементна моделі фрагмента БЦ, а також картини деформування моделі, розраховані чисельно методом скінченних елементів.

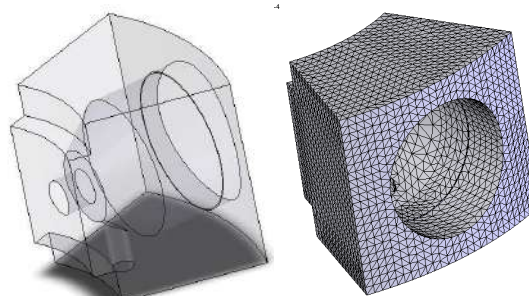
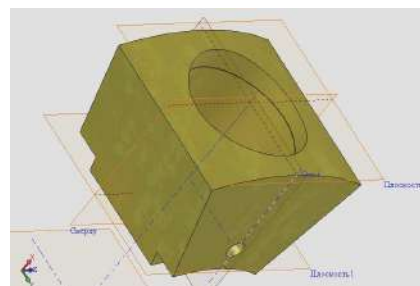
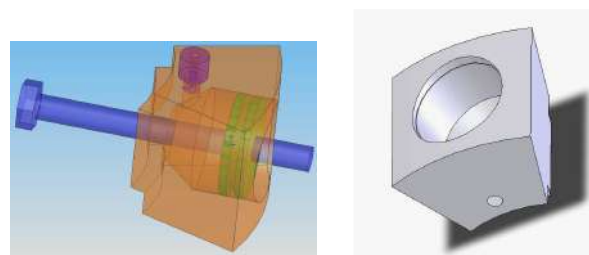


Рисунок 16 – Геометрична та скінченно-елементна моделі фрагмента БЦ

Аналіз наведених результатів свідчить про повний якісний збіг розподілів та задовільну їх кількісну відповідність. Дійсно, виявлені в ході експериментів, здавалося б, парадоксальні



особливості деформування досліджуваної поверхні (тобто прогин у бік, протилежний внутрішньому тиску робочого тіла в зоні  $[\alpha_1 \rightarrow 11, \alpha_2 \rightarrow 0]$ ) збігаються з отриманими чисельно і зумовлені, в основному, характером граничних умов, що використовуються.

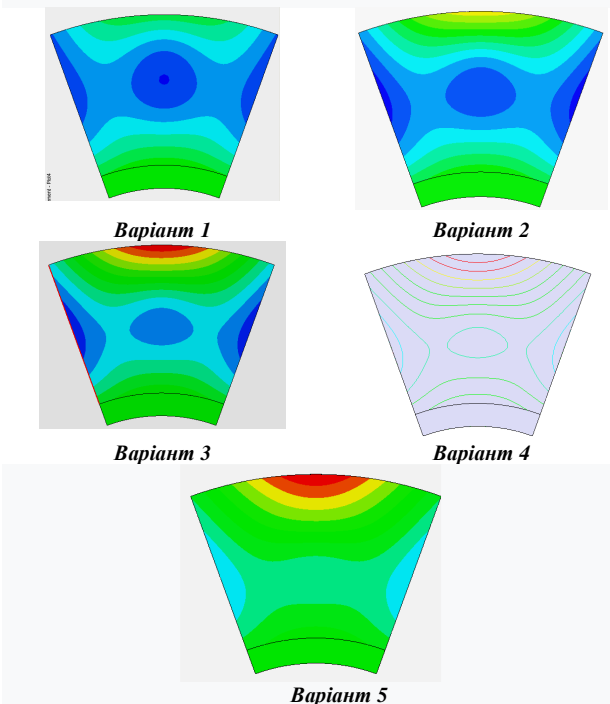


Рисунок 17 – Моделі та картини розподілів відносних переміщень для 5-ти варіантів досліджень моделі фрагмента БЦ ГОП-900 за результатами чисельних досліджень

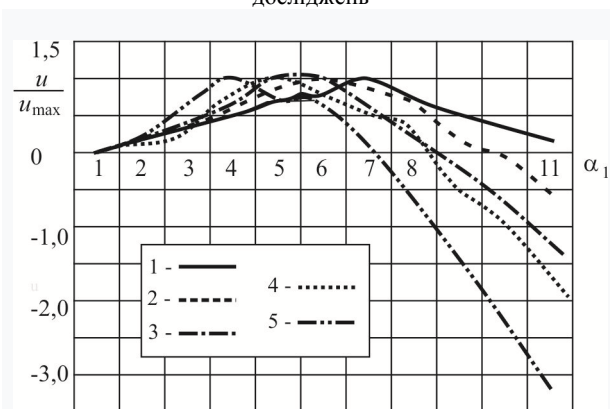


Рисунок 18 – Картини розподілу відносних переміщень у перерізі  $O\alpha_1$  для 5-ти варіантів досліджень моделі фрагмента КГН ГОП-900, отримані чисельно

Для перенесення отриманих даних на корпус гідронасоса, виготовленого, наприклад, зі сталей, був здійснений додатковий чисельний аналіз напружено деформованого стану фрагмента блоку циліндрів, виготовленого зі сталі. Отримані картини напружено-деформованого стану за характером розподілу переміщень і напружень практично повністю збігаються з отриманими на моделі із плексигласу. Чисельні значення переміщень і напружень для натурального об'єкта виходять із аналогічних величин для моделі із

коефіцієнтом  $k_M = E_{cm} / E_n$ , де  $E_{cm}$  – модуль пружності сталі;  $E_n$  – модуль пружності плексигласу з похибкою 5–7 %.

Розподіли чисельно та експериментально отриманих переміщень у перерізах  $O\alpha_1$  для різних варіантів відрізняються не більше, ніж на 7–10 %.

Оскільки така відповідність результатів досягнута не на одному досвіді (разовому експерименті), а в їх серії, це дає підставу стверджувати:

- запропонована спеціалізована система аналізу напружено-деформованого стану та визначення раціональних параметрів елементів ГОП-900 працездатна та дає можливість отримувати достовірні результати;

- тетрадральні скінченно-елементні моделі, що використовуються, забезпечують прийнятну точність розрахунків (а призматичні скінченні елементи цей рівень точності ще підвищують);

- запропонований спосіб, що поєднує скінченно-елементне та спекл-голографічне дослідження НДС елементів БЦ гідрооб'ємних передач, може бути з успіхом поширений і на інші типи гідромашин, різко підвищуючи достовірність результатів досліджень.

**Висновки.** У ході здійснення розрахунково-експериментальних досліджень:

- 1) підтверджено достатню точність використовуваної скінченно-елементної моделі;
- 2) визначено параметри скінченно-елементної моделі, що мають достатню точність чисельного моделювання методом скінченних елементів;
- 3) установлено, що невідповідність результатів обчислень та вимірювань – на рівні до 10%;
- 4) загалом обґрунтовано адекватність математичних, достатність чисельних моделей та точність результатів розрахунково-експериментальних досліджень.

Це дає підстави для висновку про застосовність такого типу моделей до чисельного аналізу НДС блоку циліндрів гідропередач, інших елементів трансмісій, двигунів та широкого класу конструкцій.

#### Список літератури

1. Мартыненко А.В., Ткачук А.В., Зарубина А.А., Бондаренко Л.Н. Комплексные исследования влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние блока цилиндров гидропередачи ГОП-900. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»: Тем. вип.: Машинознавство та САПР.* Харків: НТУ «ХП». 2007. № 3. С. 73–81.
2. Мартыненко А. В., Ткачук А. В., Зарубина А. А., Васильев А. Ю. Расчетно-экспериментальное исследование элементов гидрообъемных передач. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»: Тем. вип.: Динаміка та міцність машин.* Харків: НТУ «ХП». 2005. №47. С.99–106.
3. Мартыненко А. В. К вопросу о численном моделировании и экспериментальных исследованиях элементов гидрообъемных передач. *Вестник НТУ «Харківський політехнічний інститут»: Тем. вип.: Машиноведение и САПР.* 2009. №12. С. 112–118.
4. Мартыненко А. В., Ткачук Н. Н., Скрипченко Н. Б., Бирик Д. В., Ткачук А. В., Саверская М. С., Шеманская В. В. Напряженно-деформированное состояние контактирующих элементов гидропередач. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»: Серія: Машинознавство та САПР.* Харків: НТУ «ХП». 2018. № 7 (1283). С. 47–75.
5. Аврунин Г. А., Кабаненко И. В., Хавиль В. В., Истратов А. В., Богачев С. В., Лизунов К. М. Объемная гидропередача с

- шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень. *Механика та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2004. № 3. С. 14–21.
6. Сериков В. И. Сучасні тенденції проектування, дослідження та використання гідравлічних машин у приводах механізмів і трансмісіях (оглядова стаття). *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*: Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. №2. С. 77–84.
  7. Malina O., Valeyev O. Aspects of Optimization of the Process of Computer-Aided Design of Complex Objects. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018. Vol. 51. P. 447–464. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5\_22
  8. Malina O. Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gearbox Systems. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018. Vol. 51. P. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5\_19
  9. Аврунин Г. А., Самородов В. Б., Пелипенко Е. С., Мороз И. И. Расчет объемного гидропривода подачи измельчителя древесных отходов с автовозвратом при перегрузках. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*: Серія: *Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 30–37.
  10. Лурье З. Я., Самородов В. Б., Аврунин Г. А., Цента Е. Н. Метод поліпшення динамічних характеристик процесу пуску об'ємного гідропривода з замкненим ланцюгом циркуляції робочої рідини. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*: Серія: *Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 2. С. 68–76.
  11. Фатеева Н. Н., Фатеев А. Н. Оценка показателей надежности гидрооборудования с учетом влияния величины рабочего давления. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*: Серія: *Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 104–108.
  12. Pavlenko I. V., Simonovskiy V. I., Demianenko M. M. Dynamic analysis of centrifugal machines rotors supported on ball bearings by combined application of 3D and beam finite element models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 233, 012053.
  13. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O. and Zasiadko A. Improving the output characteristics of planetary hydraulic machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 708(1), 012038. Doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012038.
  14. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Luzan P. Operating Conditions' Influence on the Change of Functional Characteristics for Mechatronic Systems with Orbital Hydraulic Motors. In: Nadykto V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham, 2019. P. 169–176
  15. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Zasiadko A. Geometrical Parameters for Distribution Systems of Hydraulic Machines. In: Nadykto V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham, 2019. P. 323–336
  16. Voloshina A., Panchenko A., Boltiansky O., Titova O. (2020) Improvement of Manufacture Workability for Distribution Systems of Planetary Hydraulic Machines. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 732–741, (2020),
  17. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O. and Caldare A. Design of Hydraulic Mechatronic Systems with Specified Output Characteristics. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 42–51
  18. Załuski P. Influence of Fluid Compressibility and Movements of the Swash Plate Axis of Rotation on the Volumetric Efficiency of Axial Piston Pumps / *Energies*. 2022. Vol. 15(1). P. 298
  19. Siwulski T. Comparative studies of the dynamic response of hydraulic cylinders with different hydraulic supply systems design. *Advances in Hydraulic and Pneumatic Drives and Control. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 301–310.
  20. Destro M. C., De Negri V. J.: Method for combining valves with symmetric and asymmetric cylinders for hydraulic systems. *Int. J. Fluid Power*. 2018. Vol. 19(3). P. 126–139.
  21. Warzyńska U., Siwulski T.: Numerical analysis of the influence initial position of a piston on fluid exchange process in a hydraulic cylinder. In: Zolotarev I., Radolf V. (eds.). *25-th international conference. Engineering Mechanics*. 2019. P. 403–406.
  22. Zienkiewicz O. C. Taylor R. L., Zhu J.Z. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
  23. Вьено Ж., Смигельский П., Рейс Х. *Оптическая голография*. Пер с франц. М.: Мир, 1973. 398 с.
  24. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия*. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.
  25. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие* / под ред. Касаткина Б.С. К: Наукова думка, 1981. 584 с.

## References (transliterated)

1. Marty`enko A.V., Tkachuk A.V., Zarubina A.A., Bondarenko L.N. Kompleksny`e issledovaniya vliyaniya razlichny`kh faktorov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie bloka czilindrov gidroperedachi GOP-900. *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Tem. vip.: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2007, no. 3, pp. 73–81.
2. Marty`enko A. V., Tkachuk A. V., Zarubina A. A., Vasil`ev A. Yu. Raschetno-e`ksperymental`noe issledovanie e`lementov gidroob`emny`kh peredach. *Vi`snik NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Tem. vip.: *Dinami`ka ta mi`czni`st` mashin*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2005, no. 47, pp. 99–106.
3. Marty`enko A. V. K voprosu o chislennom modelirovanii i e`ksperymental`ny`kh issledovaniyakh e`lementov gidroob`emny`kh peredach *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj Politehnicznyj Insty`tut»*: Tem. vip.: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2009, no. 12, pp. 112–118.
4. Marty`enko A. V., Tkachuk N. N., Skripchenko N. B., Bibik D. V., Tkachuk A. V., Saverskaya M. S., Shemanskaya V. V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kontaktiruyushihkh e`lementov gidroperedach. *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2018, no. 7 (1283), pp. 47–75.
5. Avrunin G. A., Kabanenko I. V., Khavil` V. V., Istratov A. V., Bogachev S. V., Lizunov K. M. Ob`emnaya gidroperedacha s sharikovy`mi porshnyami GOP-900: kharakteristiki i tekhnicheskij uroven`. *Mekhani`ka ta mashinobuduвання*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2004, no. 3, pp. 14–21.
6. Syerikov V. G. Suchasni` tendenci`yi proektuvannya, dosli`dzhennya ta vikoristannya gi`dravli`chnikh mashin u privodakh mekhanizmi`v i` transmi`si`yakh (oglyadova stat`tya). *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2021, no. 2, pp. 77–84.
7. Malina O., Valeyev O. Aspects of Optimization of the Process of Computer-Aided Design of Complex Objects. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018, vol. 51, pp. 447–464. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5\_22
8. Malina O. Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gearbox Systems. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018, vol. 51, pp. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5\_19
9. Avrunin G. A., Samorodov V. B., Pelipenko E. S., Moroz I. I. Raschet ob`emnogo gidroprivoda podachi izmel`chitelya drevesny`kh otkhodov s avtovozvratom pri peregruzkakh. *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Seriya: *Gi`dravli`chni` mashini ta gi`droagregati*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019, no. 1, pp. 30–37.
10. Lur`e Z. Ya., Samorodov V. B., Avrunin G. A., Czenta E. N. Metod poli`shennya dinami`chnikh kharakteristik procesu pusku ob`yemnogo gi`droprivoda z zamknеним lancyugom czirkulyaczi`yi robochoyi ri`dini. *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Seriya: *Gi`dravli`chni` mashini ta gi`droagregati*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019, no. 2, pp. 68–76.
11. Fateeva N. N., Fateev A. N. Ocenka pokazatelej nadezhnosti gidrooborudovaniya s uchetom vliyaniya velichiny` rabocheho davleniya. *Visny`k NTU «Kharkivs`kyj politehnicznyj insty`tut»*: Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019, no. 1, pp. 104–108.
12. Pavlenko I. V., Simonovskiy V. I., Demianenko M. M. Dynamic analysis of centrifugal machines rotors supported on ball bearings by combined application of 3D and beam finite element models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 233, 012053.
13. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O. and Zasiadko A. Improving the output characteristics of planetary hydraulic machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 708(1), 012038.
14. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Luzan P. Operating Conditions' Influence on the Change of Functional Characteristics for Mechatronic Systems with Orbital Hydraulic Motors. In: Nadykto V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*.

- Springer, Cham, 2019. P. 169–176
15. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Zasiadko A. Geometrical Parameters for Distribution Systems of Hydraulic Machines. In: Nadykto V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham, 2019. P. 323–336
  16. Voloshina A., Panchenko A., Boltvansky O., Titova O. (2020) Improvement of Manufacture Workability for Distribution Systems of Planetary Hydraulic Machines. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 732-741, (2020)
  17. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O. and Caldare A. Design of Hydraulic Mechatronic Systems with Specified Output Characteristics. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 42–51 DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5\_5.
  18. Zaluski P. Influence of Fluid Compressibility and Movements of the Swash Plate Axis of Rotation on the Volumetric Efficiency of Axial Piston Pumps. *Energies*. 2022, vol. 15(1), pp. 298 doi.org/10.3390/en15010298
  19. Siwulski T. Comparative studies of the dynamic response of hydraulic cylinders with different hydraulic supply systems design. *Advances in Hydraulic and Pneumatic Drives and Control. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020, pp. 301–310.
  20. Destro M. C., De Negri V. J.: Method for combining valves with symmetric and asymmetric cylinders for hydraulic systems. *Int. J. Fluid Power*. 2018, vol. 19(3), pp. 126–139.
  21. Warzyńska U., Siwulski T.: Numerical analysis of the influence initial position of a piston on fluid exchange process in a hydraulic cylinder. In: Zolotarev I., Radolf V. (eds.). *25-th international conference. Engineering Mechanics*. 2019, pp. 403–406.
  22. Zienkiewicz O. C. Taylor R. L., Zhu J.Z. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
  23. V'eno Zh., Smigel'skij P., Rejs Kh. *Opticheskaya golografiya*. Per s francz. M.: Mir, 1973. 398 p.
  24. Vest Ch. *Golograficheskaya interferometriya*. Per. s angl. M.: Mir, 1982. 504 p.
  25. *E'ksperimental'ny'e metody issledovaniya deformacij i napryazhenij. Spravochnoe posobie / pod red. Kasatkina B.S. K: Naukova dumka, 1981. 584 p.*

Надійшла (received) 12.01.2022

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: [andrej8383@gmail.com](mailto:andrej8383@gmail.com).

**Третяк Владислав Володимирович (Третьяк Владислав Владимирович, Tretyak Vladeslav)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. МІТ-219м, м. Харків, Україна; e-mail: [vladeslav2205@gmail.com](mailto:vladeslav2205@gmail.com)

**Волошина Ірина Олександрівна (Волошина Ирина Александровна, Voloshyna Iryna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. МІТ-218м, м. Харків, Україна; e-mail: [s1802@tmm-sapr.org](mailto:s1802@tmm-sapr.org).

**Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola M.)** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; тел.: (057)7076902; e-mail: [m.tkachuk@tmm-sapr.org](mailto:m.tkachuk@tmm-sapr.org).

**Марусенко Світлана Іванівна (Марусенко Светлана Ивановна, Marusenko Svitlana)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-5491>; e-mail: [svimar@ukr.net](mailto:svimar@ukr.net).

**Сериков Володимир Іванович (Сериков Владимир Иванович, Serykov Volodymyr)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: [SerikovVI@tmm-sapr.org](mailto:SerikovVI@tmm-sapr.org).

**Гречка Ірина Павлівна (Гречка Ирина Павловна, Hrechka Iryna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4907-9170>; тел.: (057)7076534; e-mail: [girinap7@gmail.com](mailto:girinap7@gmail.com).

**Ткачук Ганна Володимирівна (Ткачук Анна Владимировна, Tkachuk Ganna)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0435-1847>, e-mail: [TkachuckAV@tmm-sapr.org](mailto:TkachuckAV@tmm-sapr.org).

**Зарубіна Алла Олександрівна (Зарубина Алла Александрівна, Zarubina Alla)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3334-792X>; e-mail: [zaralla8@gmail.com](mailto:zaralla8@gmail.com).

**Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Vasiliev Anton)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: [AVasiliev@tmm-sapr.org](mailto:AVasiliev@tmm-sapr.org).

**Стаховський Олег Валерійович (Стаховский Олег Валерьевич, Stakhovskiy Oleh)** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри військової підготовки офіцерів запасу, м. Харків, Україна; тел.: (050) 254-75-28, e-mail: [dr.stahman@gmail.com](mailto:dr.stahman@gmail.com)