

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

АРІАН РАСУЛ

УДК 621.431.3:004.896


## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРШНІВ ДВЗ В БАГАТОЕТАПНІЙ САПР

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

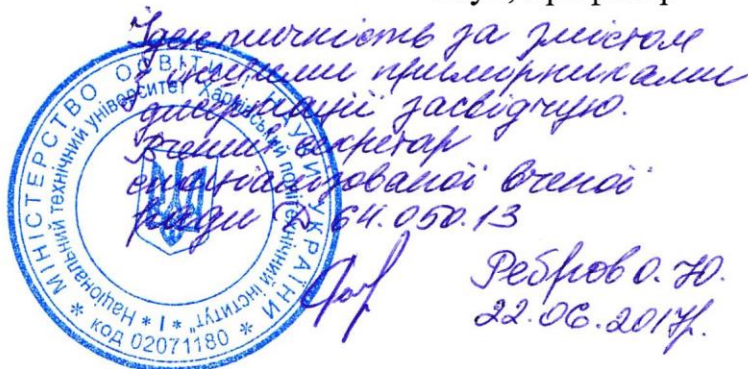
Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Аріан Расул

Науковий керівник – Пильов Володимир Олександрович, доктор технічних  
наук, професор



## АНОТАЦІЯ

*Arian Расул*. Підвищення ефективності моделювання теплонапруженого стану поршнів ДВС у багатоетапній САПР. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена актуальному питанню –прогнозуванню теплонапруженого стану та втрати міцності поршнів двигунів внутрішнього згоряння у САПР. Актуальність роботи полягає у підвищенні ефективності процесу проектування на основі дотримання концепції гарантованого забезпечення ресурсу конструкції при зменшенні повернень на попередні етапи проектування з тих чи інших пройдених етапів.

Вимоги до показників двигунів внутрішнього згоряння з кожним роком стають все більш жорсткими. Однак зростання ефективності двигунів приводить до погіршення теплонапруженого стану їх деталей. Найбільший вплив при форсуванні двигуна відчуває на собі камера згоряння. Саме розтріскування кромки поршнів є однією з проблем, що загострюється при форсуванні двигунів.

Загострення проблеми розтріскування особливо термонавантажених зон поршнів пов'язують з їх перегрівом та частими й різкими змінами навантажень двигунів в експлуатації. Розв'язання означеної проблеми здійснюється за широким спектром напрямів та рішень, що продукує задачі вибору найбільш раціонального з них через урахування факторів, що впливають на міцність конструкції.

Використання САПР ДВЗ повинно гарантовано забезпечувати термін експлуатації двигуна, проте виникнення тріщин в камерах згоряння поршнів в експлуатації свідчить про наявні відхилення від концепції гарантованого забезпечення міцності в методиках і моделях, що застосовуються під час проектування.

Аналіз питання показав, що наявні відхилення від концепції гарантованого забезпечення міцності в методиках і моделях, що застосовуються, пов'язані з

можливим необґрунтованим рівнем припущень та спрощень вхідних, зовнішніх, внутрішніх та вихідних параметрів моделей та, відповідно, з необґрунтованими маршрутами проектування.

У роботі здійснено аналіз сучасного стану методів, моделей і методик прогнозування термонапруженого стану та ресурсу кромки камер згоряння поршнів форсованих двигунів, маршрутів проходження проектів у САПР; виконано експериментальне дослідження щодо удосконалення моделі граничних умов 3-го роду задачі теплопровідності поршня; встановлено особливості зміни температурного та термонапруженого стану в коловому напрямі кромки камери згоряння з урахуванням змін геометрії поршня та рівня форсування двигуна; вдосконалено методики прогнозування ресурсу кромки камер згоряння поршнів на початкових етапах проходження проекту в багатоетапній САПР; на прикладі поршня дизеля 4ЧН12/14 визначено резерви підвищення ресурсу.

Проведені дослідження дозволили підвищення ефективності процесу проектування здійснювати на основі комплексного аналізу щодо припустимого спрощення геометричної та розрахункової моделей, моделі експлуатації двигуна та відповідних до неї граничних умов задачі теплопровідності поршня.

Проведені дослідження дозволили удосконалити модель граничних умов 3-го роду задачі теплопровідності поршня. Одним з вагомих факторів впливу є кут випередження подачі палива. Через це було запропоновано залежність локального по поверхні камери згоряння коефіцієнту тепловіддачі, яка враховує кут випередження подачі палива. На підтвердження відповідності використання математичних моделей та для ідентифікації граничних умов в роботі проведено експериментальне дослідження температурного стану поршня дизельного двигуна 4ЧН12/14. Матеріал поршня – алюмінієвий сплав АК12М2МгН. Оцінено вплив кута випередження подачі палива на термонапружений стан та втрату міцності кромки камери згоряння поршня.

Проведені дослідження дозволили визначити вплив рівнів спрощень геометрії, граничних умов теплопровідності поршня та рівня форсування двигуна на результати розрахунку температур, термічних напружень та накопичених

пошкоджень в зоні кромки камери згоряння поршня. Показано, що локальні зміни геометрії вогневої поверхні поршня можуть приводити до різнонаправлених змін температурного та термонапруженого стану таких зон.

Проведені дослідження дозволили уточнити методику прогнозування накопичення пошкоджень в матеріалі поршня, розробити рекомендації щодо вибору визначального режиму навантаження двигуна. В ході дослідження отримано найбільш економічну модель експлуатації двигуна, що відповідає концепції гарантованого забезпечення міцності конструкції.

Дослідження дозволило на основі аналізу отриманих багатоваріантних розрахунків удосконалити схему послідовності етапів аналізу теплонапруженості поршня на початкових етапах його проектування. Відповідно удосконалено методику проходження проекту поршня в багатоетапній САПР при допустимій мінімізації витрат часу на початкових етапах проектування.

На прикладі дизеля 4ЧН12/14 проаналізовано вплив конструктивних заходів на рівень температур, термічних напружень і міцності кромки камери згоряння. З використанням запропонованої схеми реалізовано аналіз трьох конструкцій поршнів, дві з яких, з вдосконаленими порожнинами галерейного масляного охолодження, запатентовано.

Розроблені моделі, методики та надані рекомендації дозволяють здійснювати уточнене прогнозування теплонапруженості поршнів двигунів внутрішнього згоряння за комплексом критеріїв їх теплонапруженості при дотриманні концепції гарантованого забезпечення ресурсу на початкових етапах аналізу конструкцій в багатоетапній САПР.

Результати дослідження використовуються в ІПМаш ім. А.М.Підгорного НАН України, а також в практиці наукових досліджень та в навчальному процесі кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП».

Ключові слова: поршень, теплонапружена зона, втрата міцності, гарантоване забезпечення ресурсу, граничні умови, математичне моделювання, модель експлуатації, маршрут проектування, багатоетапна САПР.

*Список публікацій здобувача.*

1. Ариан Расул. Совершенствование методики сравнительной оценки термонапряженного состояния поршней / В.А. Пылёв, А.В. Белогуб, И.А. Нестеренко, А.Ю. Федоров, Ариан Расул, В.А. Хижняк // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. №2. — С. 68-72.
2. Aryan Rasoul. Analysis Temperature State and Simulation of Piston in Diesel Engines with using Computer-Aided Design/ Pylyov V., Aryan Rasoul, Nesterenko I.// Науково-технічний журнал "Industrial Technology and Engineering" Південно-Казахстанський державний університет ім. М. Ауезова 2015. №2. - С. 21-28.
3. Ариан Расул. Оценка теплонапряженности поршня с учётом его конструктивных особенностей в зоне кромки камеры сгорания / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания. — 2015. №2. — С.47-52.
4. Aryan Rasoul. The Effect of fuel Injection Advance Angel on Temperature State of Diesel Engine Piston / Pylyov V., Aryan Rasoul // Науково-технічний журнал "Proceedings of the Institute of Vehicles" Інститут транспортних засобів Варшавського технологічного університету. — 2016. №4. - С.77-86.
5. Ариан Расул. Совершенствование методического обеспечения САПР поршня ДВС / В.А. Пылёв, И.А. Нестеренко, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания. — 2016. №1. — С.33-39.
6. Ариан Расул. Влияние формоизменения выборок в зоне кромки камеры сгорания поршня дизеля на температурное состояние кромки / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания. — 2016. №2. — С.59-62.
7. Ариан Расул. Влияние особенностей учета геометрии конструкции поршня дизеля на его расчетную теплонапряженность / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». — 2017. — №5. — С.54-58.
8. Пат. 113642 Україна, МПК F02F 3/00. Поршень для двигуна внутрішнього згорання / Пильов В.О., Ариан Расул, Шульга І.М.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». — № U201607549; заявл. 11.07.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

9. Ариан Расул. Оценка теплонапряженности поршня двигателя внутреннего сгорания на начальных этапах его проектирования // В.А.Пылёв, Ариан Расул, В.А. Хижняк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2014): XXII міжнарод. науково-практич. конф., 21-23 трав. 2014 р.: тези доп. – Х., 2014. – С. 234.

10. Ариан Расул. Анализ научных разработок для обеспечения работоспособности камер сгорания в дизельных двигателях// Ариан Расул, Пылёв В.А. / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2015): XXIII міжнарод. науково-практич. конф., 20-22 трав. 2015 р.: тези доп. – Х., 2015. – С. 143.

11. Ариан Расул. Повышение эффективности уровня прочности поршней автотракторных дизелей / Ариан Расул // Україна і світ: гуманітарно-технічна еліта та соціальний прогрес: міжнар. науково-теоретич. конф., 7-8 квіт. 2015 р.: тези доп. – Х., 2015. – С. 7.

12. Ариан Расул. Удосконалення методики прогнозування ресурсної міцності поршнів в САПР/ Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2017): XXV міжнарод. науково-практич. конф., 17-19 трав. 2017 р.: тези доп. – Х., 2017. – С. 182.

## ***ABSTRACT***

***Aryan Rasoul*** Improvement of the simulation of the heat-stressed state of internal combustion engine (ICE) pistons in a multi-stage CAD/CAE. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.05.03 "Engines and Power plants". - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to the actual issue - forecasting of the heat stressed state and loss of strength of internal combustion engine pistons in CAD/CAE. The urgency of the work is to increase the efficiency of the design process on the basis of observance of the concept of guaranteed maintenance of the design resource with a reduction of returns to the previous stages of designing from those or other stages passed.

Requirements for indicators of internal combustion engines are becoming increasingly rigid every year. However, the increased efficiency of engines leads to a deterioration of the heat-stressed state of their parts. The greatest impact on the engine's engine is felt on its own combustion chamber. It is the cracking of the piston edges that is one of the problems that exacerbates when engines are thrown.

The aggravation of the cracking problem of especially heat-charged zones of pistons is associated with their overheating and frequent and abrupt changes in the loads of engines in operation. The solution of this problem is carried out in a wide range of directions and solutions, which produces the tasks of choosing the most rational one, taking into account the factors that influence the strength of the structure.

The use of CAD/CAE, ICE should be guaranteed to ensure the life of the engine, but the occurrence of cracks in the combustion chambers of the pistons in operation indicates the existence of deviations from the concept of guaranteed durability in the techniques and models that are used during the design.

The analysis of the question showed that the existing deviations from the concept of guaranteed durability in the applied methods and models are related to the possible unreasonable level of assumptions and simplifications of the input, external,

internal, and output parameters of the models and, accordingly, unreasonable design routes.

In the work the analysis of the current state of methods, models and methods of prediction of the thermo-stressed state and resource of the combustion chamber edges of the pistons of forced engines, the routes of passing the projects in the CAD/CAE; an experimental study was carried out on the improvement of the model of boundary conditions of the third kind of the problem of the heat conductivity of the piston; the peculiarities of the change of temperature and thermo-stressed state in the circular direction of the edge of the combustion chamber, taking into account the changes in the piston geometry and the level of engine forcing, are established; methods of forecasting the resource of the edges of the piston combustion chambers at the initial stages of the project passage in multi-stage CAD/CAE were improved; on the example of a 4CHN12/14 diesel piston, resource reserves have been set.

The conducted studies allowed to increase the efficiency of the design process on the basis of a comprehensive analysis of the permissible simplification of geometric and calculation models, the model of operation of the engine and its corresponding boundary conditions of the problem of heat conductivity of the piston.

The conducted studies allowed to improve the model of boundary conditions of the third kind of the problem of the heat conductivity of the piston. One of the important factors of influence is the angle of advance of fuel supply. Due to this, the dependence of the heat transfer coefficient local on the surface of the combustion chamber was proposed, which takes into account the angle of advance of fuel supply. An experimental study of the temperature state of the diesel engine piston 4CHN12/14 was carried out to confirm the use of mathematical models and to identify the boundary conditions in the work. Material of the piston - aluminum alloy AK12M2MgN. The effect of the fuel advance ahead of the thermo-stressed state and loss of strength of the piston comb.

The conducted studies allowed to determine the influence of levels of simplifications of geometry, boundary conditions of the conductivity of the piston and the level of engine forcing on the results of calculating the temperature, thermal stress



and accumulated damage in the zone of the edge of the combustion chamber of the piston. It is shown that local changes in the geometry of the piston's fire surface can lead to various-directional changes in the temperature and thermo-stress state of such zones.

The conducted studies allowed to clarify the method of forecasting the accumulation of damage in the material of the piston, to develop recommendations for choosing the determining mode of loading of the engine. During the study the most economical model of operation of the engine was obtained, which corresponds to the concept of guaranteed durability of the construction.

The research allowed on the basis of the analysis of the multivariate calculations to improve the scheme of the sequence of stages of the analysis of the heat stress of the piston at the initial stages of its design. Accordingly, the method of passing a piston project in a multi-stage CAD/CAE system has been improved with allowable minimization of the time expenditures at the initial stages of designing.

On the example of a 4CHN12/14 diesel engine the influence of design measures on the level of temperature, thermal stresses and the strength of the edge of the combustion chamber is analyzed. Using the proposed scheme, an analysis of three piston designs, two of which, with improved cavities of the gallery oil cooling, was patented.

The developed models, methods and the given recommendations allow to carry out the refined prediction of heat stress of pistons of internal combustion engines on a complex of criteria of their heat stresses under the concept of guaranteed maintenance of the resource at the initial stages of the analysis of constructions in a multi-stage CAD/CAD.

The results of the study are used in IPMasch them A.M.Pidgorny of the National Academy of Sciences of Ukraine, as well as in the practice of scientific research and in the educational process of the Department of Internal Combustion Engines NTU "KhPI".

Keywords: piston, heat-stressed zone, loss of strength, guaranteed resource supply, boundary conditions, mathematical modeling, operation model, design route,

multi-stage CAD/CAE.

### **List of publisher publications**

1. Ариан Расул. Совершенствование методики сравнительной оценки термонапряженного состояния поршней / В.А. Пылёв, А.В. Белогуб, И.А. Нестеренко, А.Ю. Федоров, Ариан Расул, В.А. Хижняк // Двигатели внутреннего сгорания.– 2014. №2. – С. 68-72.

2. Aryan Rasoul. Analysis Temperature State and Simulation of Piston in Diesel Engines with using Computer-Aided Design / Pylyov V., Aryan Rasoul, Nesterenko I. // Industrial Technology and Engineering. – SKSU named after M.Auezov, Kazakhstan, – 2015. №2. - P. 21-28.

3. Ариан Расул. Оценка теплонапряженности поршня с учётом его конструктивных особенностей в зоне кромки камеры сгорания / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. №2. – С.47-52.

4. Aryan Rasoul. The Effect of fuel Injection Advance Angel on Temperature State of Diesel Engine Piston / Pylyov V., Aryan Rasoul // Proceedings of the Institute of Vehicles. – Warsaw Institute of Technology, Poland. – 2016. №4. - P.77-86.

5. Ариан Расул. Совершенствование методического обеспечения САПР поршня ДВС / В.А. Пылёв, И.А. Нестеренко, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. №1. – С.33-39.

6. Ариан Расул. Влияние формоизменения выборок в зоне кромки камеры сгорания поршня дизеля на температурное состояние кромки / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Двигатели внутреннего сгорания.– 2016. №2. – С.59-62.

7. Ариан Расул. Влияние особенностей учета геометрии конструкции поршня дизеля на его расчетную теплонапряженность / В.А. Пылёв, Ариан Расул // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2017. – №5. – С.54-58.

8. Пат. 113642 Україна, МПК F02F 3/00. Поршень для двигуна внутрішнього згорання / Пильов В.О., Аріан Расул, Шульга І.М.; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № U201607549; заявл. 11.07.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл.

№ 3.

9. Ариан Расул. Оценка теплонапряженности поршня двигателя внутреннего сгорания на начальных этапах его проектирования // В.А.Пылёв, Ариан Расул, В.А. Хижняк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2014): XXII міжнарод. науково-практич. конф., 21-23 трав. 2014 р.: тези доп. – Х., 2014. – С. 234.

10. Ариан Расул. Анализ научных разработок для обеспечения работоспособности камер сгорания в дизельных двигателях// Ариан Расул, Пылёв В.А. / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2015): XXIII міжнарод. науково-практич. конф., 20-22 трав. 2015 р.: тези доп. – Х., 2015. – С. 143.

11. Ариан Расул. Повышение эффективности уровня прочности поршней автотракторных дизелей / Ариан Расул // Україна і світ: гуманітарно-технічна еліта та соціальний прогрес: міжнар. науково-теоретич. конф., 7-8 квіт. 2015 р.: тези доп. – Х., 2015. – С. 7.

12. Ариан Расул. Удосконалення методики прогнозування ресурсної міцності поршнів в САПР/ Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2017): XXV міжнарод. науково-практич. конф., 17-19 трав. 2017 р.: тези доп. – Х., 2017. – С. 182.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕР- МОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА РЕСУРСНОЇ НАДІЙНОСТІ ПОРШНІВ ФОРОВАНИ Х ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГО- РЯННЯ.....	11
1.1 Основні проблеми та напрями удосконалення технології підтримки життєвого циклу ДВЗ та поршня ДВЗ.....	11
1.2 Основні проблеми та напрями удосконалення конструкцій поршнів, пов’язані з підвищеною їх теплонапруженістю.....	16
1.3 Моделювання температурного і напружено-деформованого стану по- ршня, втрати його ресурсної міцності .....	21
1.4 Загальний математичний вираз, що застосовується при проектуванні поршня в САПР та проблематика його використання.....	36
1.5 Аналіз конструктивних рішень, направлених на підвищення ресурс- ної міцності теплонапружених зон поршнів ДВЗ.....	40
1.6 Висновки по розділу.....	41
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДІВ І МЕТОДИК АНА- ЛІЗУ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРШНІВ.....	44
2.1 Урахування особливостей геометрії конструкції.....	44
2.2 Урахування режиму навантаження двигуна.....	47
2.2.1 Граничні умови стаціонарної задачі теплопровідності поршня.....	48
2.2.2 Функції керування граничними умовами нестационарної задачі те- плопровідності поршня .....	50
2.2.3 Комплекс моделей для оцінки ресурсної міцності поршня на різних етапах його проектування.....	51

2.3 Варіанти критерію якості теплонапруженості поршня .....	65
2.4 Можливі варіанти спрощень розрахункової моделі поршня .....	70
2.5 Висновки по розділу.....	73
<b>РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ПОРШНЯ ТА ОБРОБКА ЙОГО РЕЗУЛЬТАТІВ.....</b>	
3.1 Опис конструкції дослідного поршня та експериментальної установки .....	77
3.2 Програма експерименту .....	82
3.3 Результати експериментального дослідження температурного стану поршня .....	83
3.4 Висновки по розділу .....	88
<b>РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ РОЗРОБЛЕНИХ ПІДХОДІВ І МЕТОДИК, ЩО ПІДВИЩУЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРШНЯ.....</b>	
4.1 Ідентифікація граничних умов задачі теплопровідності .....	90
4.2 Аналіз температур і термічних напружень поршня на визначальному стаціонарному режимі роботи двигуна .....	102
4.3 Температурний та напружений стани конструкції визначального перехідного процесу, рівень накопичених пошкоджень термонавантаженої зони КЗ .....	114
4.4 Послідовність етапів аналізу теплонапруженості поршня на початкових етапах його проектування.....	118
4.5 Порівняльний аналіз теплонапруженості конструкцій поршнів.....	122
4.5.1 Поршень з додатковою вибіркою в зоні кромки КЗ .....	122
4.5.2 Поршень з видозміненою формою порожнини галерейного масляного охолодження.....	124
4.5.3 Гарантоване забезпечення ресурсної міцності поршнів при їх форсуванні .....	127

4.6 Висновки по розділу .....	132
ВИСНОВКИ .....	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	137
Додаток А Довідка про використання результатів дисертаційної роботи.....	153
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи .....	154
Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	156