УДК 629.048.3
DOI https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/19

Островерх О.О.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРІВ В АВТОМОБІЛЬНИХ СИСТЕМАХ КОНДИЦІЮВАННЯ

Компресори кліматичних установок – це нагнітачі витиснювального типу, для змащення яких використовується спеціальне холодильне масло, половина якого залишається в компресорі, а решта розподіляється по всьому контуру холодоагенту. На вході компресор всмоктує через випарник холодильний газоподібний холодоагент із низьким тиском і далі нагнітає його в контур високого тиску. Газоподібний стан холодоагенту «технічно необхідний» для компресора, оскільки рідкий холодоагент можна стиснути, що призвело б до руйнування компресора. У зв'язку з тим, що в сучасних автомобілях застосовуються нерегульовані компресори, які не володіють великим терміном служби, як модернізація пропонується застосування аксіально-поршневого компресора з обертовим похилим диском. Обертання його приводного валу за допомогою похилого диска перетворюється на зворотно-поступальний рух поршнів у циліндрах. Залежно від конструктивного виконання може бути від 3 до 10 поршнів, які рухаються паралельно з приводним валом. Кожному поршню відповідає впускний клапан, який відкривається відповідно до такту роботи компресора. Кліматична установка розраховується на максимальну частоту обертання компресора. Продуктивність компресора визначається швидкістю обертання колінчастого валу, що становить від 0 до 6000 об./хв.

У ході дослідження аксіально-поршневого компресора був виконаний розрахунок міцності полого поршня, застосовуваного в запропонованому компресорі з похилою шайбою, за допомогою програмного середовища КОМПАС 3D V16. Як розрахункова програма застосовано систему APM FEM («Автоматичне Проектування Машин»), яка являє собою інтегрований в КОМПАС-3D інструмент для підготовки і подальшого кінцево-елементного аналізу тривимірної твердотільної моделі. Матеріал застосований при розрахунку сталь та алюміній.

Підведені підсумки за розрахунковими даними поршня зі сплаву алюмінію і сталі. Одним з переваг алюмінієвого поршня є зменшена у два рази маса, що тягне за собою зменшення інерційних мас. За міцності обидва поршня знаходяться в межах допустимих норм, але у сталі коефіцієнт запасу по міцності практично в два рази вище. У результаті ми отримуємо два різних поршня придатних для застосування в аксіально-поршневому компресорі із похилою шайбою в системі кондиціювання автомобіля.

Ключові слова: *автомобіль, кліматична установка, аксіально-поршневий компресор, поршень.*

Постановка проблеми. Автомобільний кондиціонер являє собою досить складну систему, вимогливу до технічного обслуговування і профілактичних робіт. Основна функція кондиціонерів – обробка внутрішнього повітря в салоні, оскільки кондиціонери лише забезпечують комфортну для людини температуру, а саме охолодження або обігрів повітря.

Основним робочим вузлом автомобільної кліматичної системи служить компресор – пристрій, що перекачує холодоагент і нагнітає тиск, достатній для конденсації газу. Незважаючи на високу надійність агрегату, поломки трапляються і з ним. Якщо прийшли в непридатність внутрішні елементи конструкції, з економічної точки зору доцільно відмовитися від відновлення компресора і встановити в систему новий пристрій, що доволі дороге задоволення для власника транспортного засобу [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наслідком несвоєчасної або неграмотно проведеної профілактики стає вихід з ладу компресора кондиціонера. Про те, що компресор починає виходити з ладу, свідчать характерні гуркіт і виття, що лунає при його роботі. Існує думка, що лікувати цю недугу треба банальної дозаправкою маслом. Але на практиці це тільки відтягне сумний фінал і ускладнить завдання щодо усунення причини, що викликала поломку. Крім того, експлуатуючи компресор з явно вираженою несправністю, власник провокує лавиноподібне засмічення системи продуктами його зносу. В результаті, коли буде прийнято розумне рішення звернутися в сервіс і відремонтувати злощасний вузол, ви з подивом дізнаєтеся, що його вже доведеться міняти в зборі і, крім того, необхідно промивати систему [1–3; 9].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є дослідження застосування аксіально-поршневого

компресора з обертовим похилим диском в системі кондиціювання автомобіля.

Виклад основного матеріалу. У сучасних легкових автомобілях застосування кондиціонування повітря є обов'язковою умовою. Для цього в автомобілі передбачена компресійна холодильна установка. Холодоагент циркулює в закритому контурі і постійно переходить з рідкого стану в газоподібний і навпаки. Холодоагент піддається стиску в газоподібному стані, конденсується шляхом відведення тепла, і випаровується при зменшенні тиску в умовах підведення тепла (рис. 1).

Принцип роботи і схема кліматичної установки представлена на (рис. 2). Компресор всмоктує холодний, газоподібний холодоагент при низькому тиску, холодоагент стискується в компресорі і при цьому нагрівається. Він закачується в контур високого тиску, і на цій фазі холодоагент в газоподібному стані під високим тиском і при високій температурі, потрапляє по короткій гілки в конденсатор (дефлегматор). Стиснутий гарячий газ в конденсаторі віддає тепло під впливом набігаючого потоку повітря при русі автомобіля і працюючому вентиляторі [1-7].

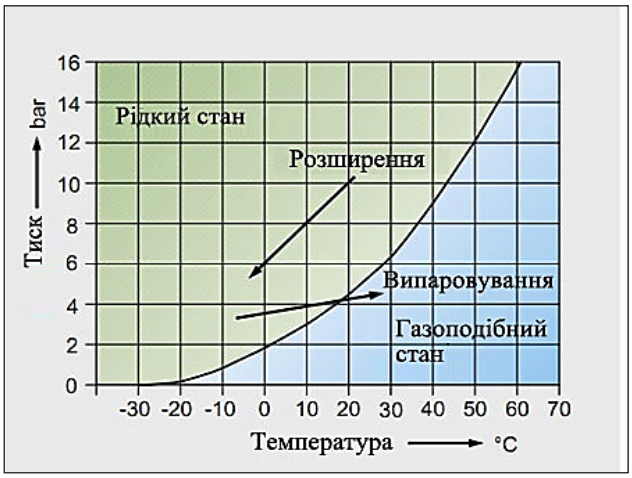


Рис. 1. Крива тиску пара в системі кондиціювання

Далі в рідкому стані проходить через дросель або розширювальний клапан. Там холодоагент розпорошується в випарник, при цьому відбувається падіння тиску (перехід на сторону низького тиску) в цій фазі холодоагент знаходиться в пароподібному стані під невисоким тиском і має невелику температуру. У випарнику розпилений холодоагент повертається в стан термодинамічної рівноваги і випаровується. Необхідна для цього теплота випаровування відводиться від свіжого повітря, що проходить через ламелі випарника, і повітря при цьому охолоджується, в салоні автомобіля стає прохолодніше. На цьому етапі холодоагент в пароподібному стані під невисоким тиском і має невелику температуру. Нижче на (рис. 3) зображені контури з розширювальним клапаном і дроселем. Далі знову газоподібний холодоагент з випарника засмоктується компресором для відновлення холодильного циклу.

За допомогою розширювального клапана відбувається регулювання потоку холодоагенту, до випарника в залежності від температури парів холодоагенту на виході з випарника:

– якщо підвищується температура холодоагенту, що виходить із випарника, то тоді холодоагент розширюється в термостаті. Потік холодоагенту через кульовий клапан до випарника збільшується;

– якщо знижується температура холодоагенту, що виходить із випарника, то тоді обсяг холодоагенту в термостаті зменшується. Потік холодоагенту через кульовий клапан до випарника зменшується.

На кліматичних установках із дросельним регулюванням замість ресивера для рідкого холодоагенту на боці високого тиску є ресивер-колектор на стороні низького тиску. Він служить в якості збірки і як захист для компресора (від гідроудару). Усі інші пристрої ідентичні пристроїв контуру з розширювальним клапаном.

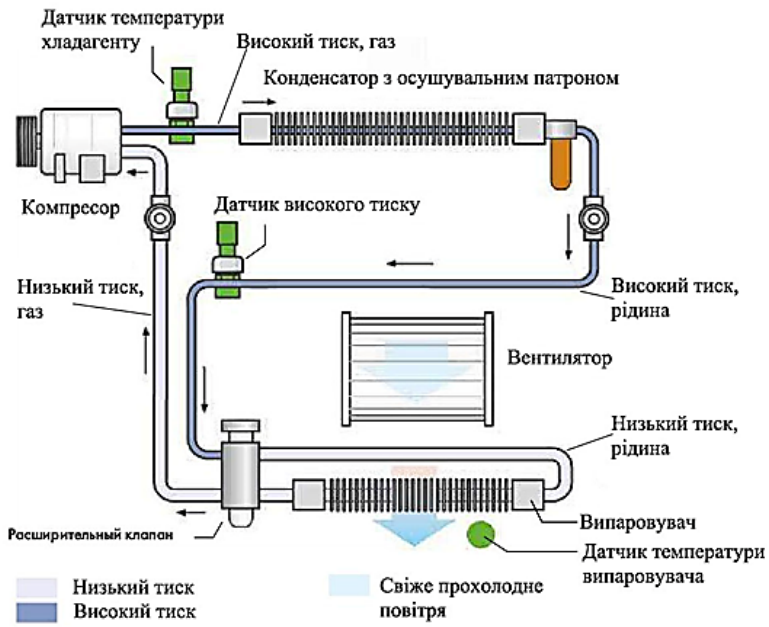
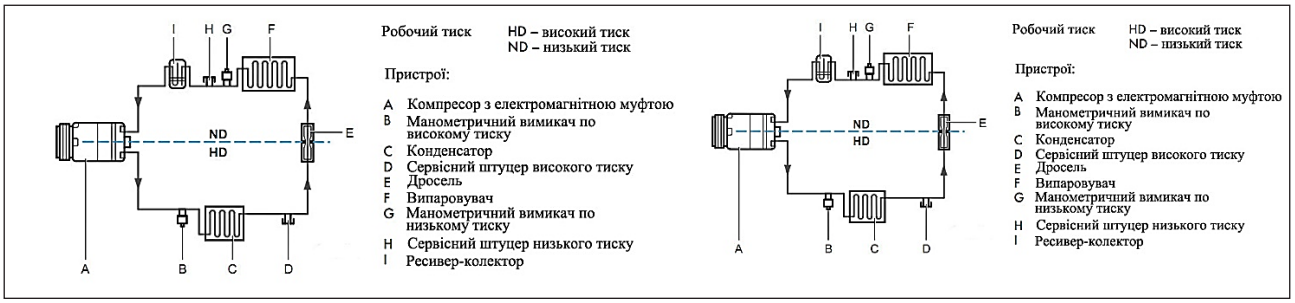


Рис. 2. Схема роботи кліматичної установки



а) б)

Рис. 3. Контур холодоагенту: а) з дроселем; б) з розширювальним клапаном

Пристрій кліматичної установки. Компресори кліматичних установок є нагнітачі витиснювального типу (рис. 4), для змащення яких використовується спеціальне холодильне масло, половина якого залишається в компресорі, а решта розподіляється по всьому контуру холодоагенту. На вході компресор всмоктує через випарник холодильний газоподібний холодоагент з низьким тиском, і далі нагнітає його в контур високого тиску.

Газоподібний стан холодоагенту «технічно необхідно» для компресора, оскільки рідкий холодоагент можна стиснути, що призвело б до руйнування компресора.

У зв'язку з тим, що в сучасних автомобілях застосовуються нерегульовані компресори, що не володіють великим терміном служби [9]. Як модернізація пропонується застосування аксіально-поршневого компресора з обертовим похилим диском (рис. 5).

Обертання приводного валу за допомогою похилого диска перетворюється в зворотно-поступальний рух поршнів в циліндрах. Залежно від конструктивного виконання може бити від 3 до 10 поршнів, які рухаються паралельно приводного валу. Кожному поршню відповідає впускний клапан. Клапан відкривається відповідно до тактом роботи компресора.

Кліматична установка розраховується на максимальну частоту обертання компресора. Продуктивність компресора визначається швидкістю обертання колінчастого валу, він становить від 0 до 6000 об/хв.

Щоб було можливим узгодити роботу компресора зі швидкістю двигуна, температурою зовнішнього повітря і температурою повітря в салоні – коротше кажучи, з потребою в хладопродуктивності – були розроблені компресори регульованою продуктивності із змінним робочим об'ємом. Це досягається зміною нахилу диска, що обертається.

У компресорах з постійним робочим об'ємом узгодження з потребою в хладопродуктивності відбувається шляхом періодичного включення і виключення компресора за допомогою електромагнітної муфти.

Електромагнітна муфта (рис. 6) здійснює силовий зв'язок між компресором і працюючим двигуном. Муфта складається з: пасових шківів з підшипником; пружного диска з маточиною; електромагнітної котушки.

Маточина підпружиненого диска жорстко монтується на приводний вал компресора. Ремінний шків може обертатися на підшипнику, закріпленому на корпусі компресора біля виходу валу. Електромагнітна котушка жорстко з'єднана з корпусом компресора. Між підпружиненим диском і ремінним шківом є зазор «А».

Двигун автомобіля через поліклиновий ремінь приводить в рух ремінний шків (показана стрілка). Шків при вимкненому кліматичної установці вільно обертається.

Коли компресор включається, до електромагнітної котушці підводиться напруга, виникає

Рис. 4. Автомобільний компресор

магнітне силове поле. Під впливом цього поля підпружинений диск, зсувається до обертається ремінному шківа (зазор «А» обраний) і утворює силову зв'язок між ремінним шківом і приводним валом компресора. Компресор починає обертатися і працює до тих пір, поки не буде відключене живлення електромагнітної котушки. Під дією пружин підпружинений диск відходить від пасових шківів, і ремінний шків знову обертається вільно, без зв'язку з приводним валом компресора.

Масло застосовується для компресорів. Для змащення всіх рухомих частин в кліматичній установці застосовується спеціальне масло – холодильне масло, яке вільне від забруднюючих частинок; сірки, воску і вологи.

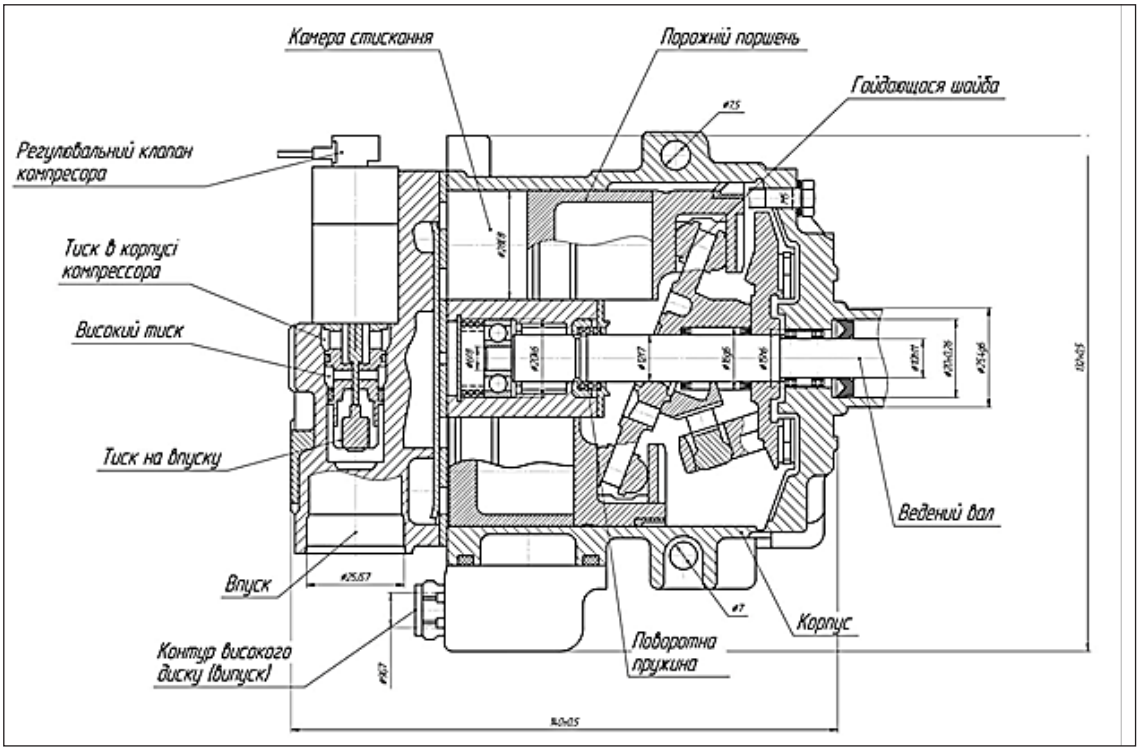


Рис. 5. Аксіально-поршневий компресор з похилою шайбою

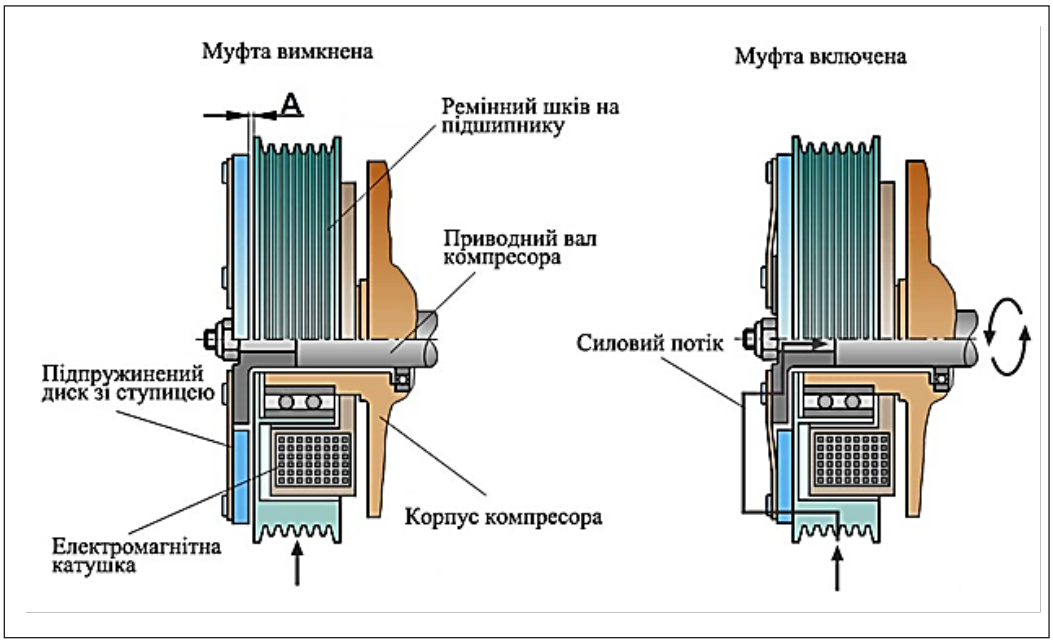


Рис. 6. Електромагнітна муфта

Таке масло має бути нейтральним по відношенню до холодоагенту, оскільки він підмішується до холодоагенту і разом з останнім переміщається по контуру холодоагенту; при цьому не повинно бути агресивного впливу на ущільнення.

Не можна використовувати ніяке інше масло, інакше це неодмінно призведе до плакуванням міддю, закоксування і утворення відкладень. Наслідком цього є передчасний знос і руйнування рухомих частин.

Для контурів із холодоагентом R134a використовується спеціальне синтетичне масло. Це масло призначене для застосування тільки з цим холодоагентом.

Наприклад, синтетичне масло вітчизняного виробництва ХАДО Refrigeration Oil 100, яке розроблено спеціально для автомобільних кондиціонерів працюють з холодоагентом R-134a. Це холодильне масло також підходить тільки для певної конструкції компресора. Холодильне масло для R134a, має позначення PAG (Poly-Alkylen-Glykol), до його властивостями належить: високий ступінь розчинності в холодоагенті; хороші змащувальні якості; не містить кислот; велика гігроскопічність (добре вбирає воду); не змішується з іншими маслами. Під час використання необхідно брати до уваги: не слід використовувати цю олію в старих кліматичних установках з холодоагентом R12, оскільки воно з останнім несумісне.

Далі в ході дослідження був виконаний розрахунок міцності полого поршня (рис. 7), застосовуваного в запропонованому аксіально-поршневому компресорі з похилою шайбою, за допомогою вбудованої бібліотеки APM FEM в КОМПАС-3D [8].

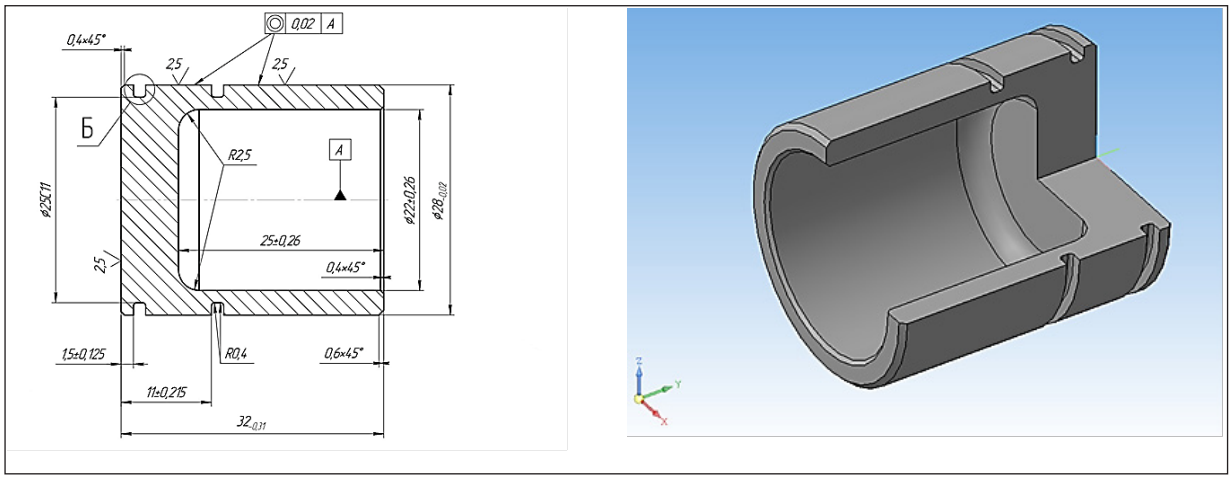
В якості матеріалу використовується сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-71, характеристики якої представлені в (табл. 1). Оскільки часто в автомобільних компресорах застосовуються алюмінієві сплави, був проведений аналіз сумісності з холодоагентами. Як показали дослідження, проведені фірмою «Du Pont», більшість із застосовуваних конструкційних металів, таких, як сталь, чавун, бронза, мідь, олово, свинець і алюміній, добре працюють з холодоагентами фірм SUVA за нормальних умов експлуатації.

Таблиця 1

Характеристики сталі

Найменування	Показники
Межа плинності, МПа	235
Модуль пружності нормальний, МПа	200000
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Щільність, кг/м^3	7800
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, 1/С	0,000012
Теплопровідність, Вт/(м·С)	55
Межа міцності при стисненні, МПа	410
Межа витривалості при розтягуванні, МПа	209
Межа витривалості при крученні, МПа	139

Далі створено кінцево-елементну сітки, (рис. 8), параметри (табл. 2). Сітка має 39738 кінцевих елементів і 8885 вузлів, які забезпечують високу точність в подальших розрахунках. Оскільки поршень порожнистий фіксація була виконана у нижній кромці (рис. 9), з додатком навантаження до торцевої робочої поверхні поршня в 0,5 Н/мм^2 і впливом температури в 40°С.



а) б)

Рис. 7. Поршень: а) кресленик; б) 3-D модель

Таблиця 2

Параметри і результати розбиття

Найменування	Показники
Максимальна довжина сторони елемента, мм	1,25
Максимальний коефіцієнт згущення на поверхні	1
Коефіцієнт розрідження в обсязі	1
Кількість кінцевих елементів	39738
Кількість вузлів	8885

Аналіз статичного розрахунку показує, що в нижній частині кромки поршня виникає максимальна напруга рівне 92 МПа (рис. 10), і результати зведені в (табл. 4).

Таблиця 3

Інерційні характеристики моделі

Найменування	Показники
Маса моделі, кг	0,080282
Центр тяжіння моделі, м	(-0; -0,012695; 0)
Моменти інерції моделі відносно центру мас, кг·м^2	(0,000005; 0,00002; 0,000005)
Реактивний момент відносно центру мас, Н·м	(0,044054; -0,00442; -0,013675)
Сумарна реакція опор, Н	(-1,02; 28583,2; -2,18)
Абсолютне значення реакції, Н	28583,239042
Абсолютне значення моменту, Н·м	0,046339

Таблиця 4

Результати статичного розрахунку

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Еквівалентне напруження по Мізесу	0,22	92

Виконано розрахунок лінійного переміщення (рис. 11 а). (табл. 5), максимальне значення якого знаходиться в межах норми. Проведено розрахунок коефіцієнта запасу по текучості (рис. 11 б) , дані (табл. 6), а також коефіцієнта запасу по міцності (рис. 11 в), (табл. 7).

Таблиця 5

Сумарне лінійне переміщення

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінійне переміщення	0	0,008624

Таблиця 6

Результати коефіцієнта запасу за текучістю

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по текучості	2,530643	938,753575

З отриманих вище результатів мінімальний коефіцієнт запасу за плинністю становить 2,53,

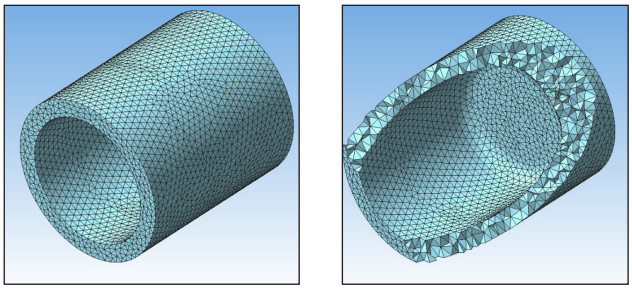


Рис. 8. Кінцево-елементна сітка поршня

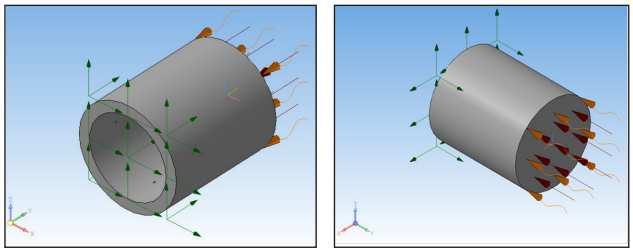


Рис. 9. Навантаження і закріплення деталі

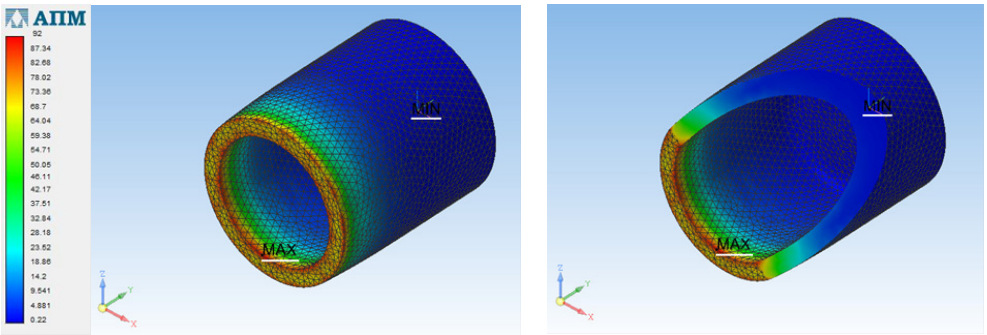


Рис. 10. Аналіз напружень

а по міцності 4,415, що є хорошим результатом забезпечує хороші показники міцності.

Таблиця 7

Коефіцієнт запасу за міцністю

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по міцності	4,415	100

Також було виконано розрахунок власних коливань, приведена 5-а форма, (рис. 11 г), (табл. 8).

Таблиця 8

Результати розрахунку власних частот

N	Частота, рад/сек	Частота, Гц
1	67830,035975	10795,485516
2	67847,829394	10798,317426
3	137322,039668	21855,481409
4	180746,91442	28766,764878
5	233730,276531	37199,32886
6	233907,711485	37227,56851
7	234740,257661	37360,072349
8	234827,242403	37373,916401

У результаті виконаного розрахунку поршень, виконаний зі сталі, повністю відповідає всім нормам і може бути використаний в аксіально-поршневому компресорі з регульованою похилою шайбою.

В якості порівняльної характеристики було зроблено розрахунок поршня із застосуванням сплаву АЛ8 ГОСТ 1583-93.

Створення кінцево-елементної сітки виконано аналогічним способом, як і фіксування, і додаток ідентичних навантажень. Інерційні характеристики наведені в (табл. 9).

Таблиця 9

Інерційні характеристики моделі зі сплаву АЛ8

Найменування	Значення
Маса моделі, кг	0,028099
Центр тяжіння моделі, м	(-0; -0,012695; 0)
Моменти інерції моделі відносно центру мас, кг·м^2	(0,000002; 0,00007; 0,000002)
Реактивний момент відносно центру мас, Н·м	(0,032536; -0,003894; -0,009558)
Сумарна реакція опор, Н	(-0,79; 25048,76; -1,41)
Абсолютне значення реакції, Н	25048,767864
Абсолютне значення моменту, Н·м	0,034133

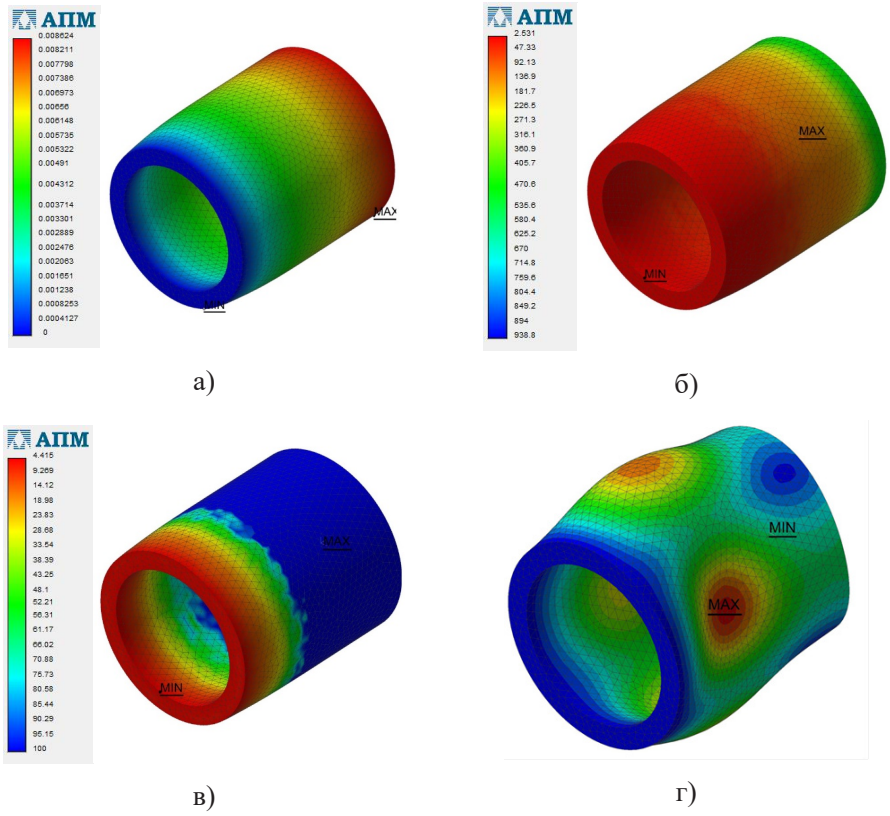


Рис. 11 Розрахунок поршня зі сталі: а) результати лінійного переміщення; б) коефіцієнт запасу по текучості; в) коефіцієнт запасу по міцності; г) 5-а форма власних коливань

Проведений статичний аналіз також показує, що в нижній частині кромки поршня виникає максимальне напруження але воно менше і дорівнює 65,52 МПа (рис. 12), результати в (табл. 10).

Таблиця 10

Результати статичного розрахунку

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Еквівалентне напруження по Мізесу	0,262536	65,516205

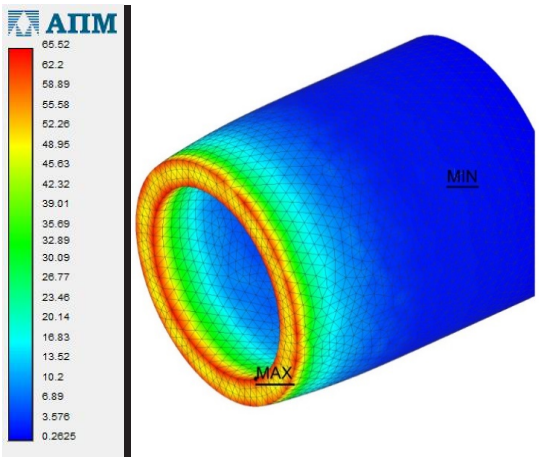


Рис. 12. Аналіз напруг сплаву АЛ8

Розрахунок лінійного переміщення (рис. 13 а), (табл. 11),в порівнянні зі сталевим поршнем збільшилася вудва рази, і дорівнює 0,017 мм.

Таблиця 11

Сумарне лінійне переміщення

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Сумарне лінійне переміщення	0	0,017256

Виконаний розрахунок коефіцієнта запасу по плинності (рис. 13 б) і отримані дані (табл. 12), вказує, що мінімальне значення змінилося незначно, дорівнює 2,75.

Таблиця 12

Результати коефіцієнта запасу по текучості

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по текучості	2,747876	716,222242

Розрахунок коефіцієнта запасу по міцності (рис. 13 в), (табл. 13) виявляється, менше майже в два рази, дорівнює 2,52, хоча і знаходиться в межах норми, і забезпечує достатні показники міцності.

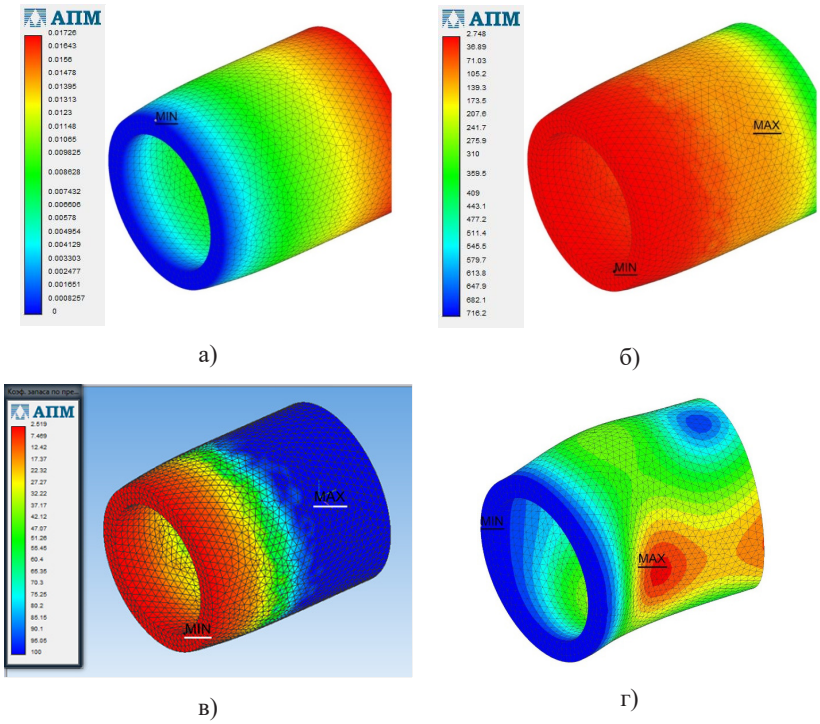


Рис. 13. Розрахунок поршня з АЛ8: а) результати лінійного переміщення; б) коефіцієнт запасу за текучістю; в) коефіцієнт запасу за міцністю; г) 5-а форма власних коливань

Таблиця 13

Коефіцієнт запасу з міцності

Найменування	Мінімальне значення	Максимальне значення
Коефіцієнт запасу по міцності	2,518886	100

Також було виконано розрахунок власних коливань, приведена 5-а форма, (рис. 13 г, табл. 14).

Таблиця 14

Результати розрахунку власних частот

N	Частота, рад/сек	Частота, Гц
1	67664,213138	10769,093991
2	67680,176348	10771,634615
3	135277,051883	21530,011494
4	181072,36603	28818,562111
5	234262,026829	37283,959548
6	234438,254447	37312,007045
7	234825,380962	37373,620144
8	235231,118029	37438,195203

Висновки. Однією з з переваг алюмінієвого поршня є зменшена у два рази маса, що тягне за собою зменшення інерційних мас. За міцністю обидва поршня знаходяться в межах допустимих норм, але у сталі коефіцієнт запасу по міцності практично в два рази вище 4,4 проти 2,5. У результаті ми отримуємо два різних поршня придатних для застосування в аксіально-поршневому компресорі з похилою шайбою, що дозволить нам виконати ремонті роботи під час виходу зі строю компресору, а не його заміну в цілому, як під час застосування нерегульованого компресора. Також ід час застосування запропонованого компресора с системі кондиціювання непотрібен такий елемент, як дросель, тому що захист від гідроудару забезпечує сам компресор.

Отже, використання аксіально-поршневих компресорів із похилою шайбою в автомобільних системах кондиціювання є перспективним напрямом.

Список літератури:

1. Ананьев В.А, Седых И.В. Холодильное оборудование для современных центральных кондиционеров. Расчеты и методы підбора : учеб. пособие Москва : Евроклимат, 2001. 96 с.

2. Ананьев В.А., Балуева Л.Н., Гальперин А.Д. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. Москва : Евроклимат, 2001. 416 с. 3-е издание

3. Доссат Рой Дж. Основы холодильной техники. Москва, 1984. 508 с.

4. Коляда В.В. Кондиционеры. Принципы работы, монтаж, установка, эксплуатация. Рекомендации по ремонту. Москва, 2002. 240 с.

5. Кругляк И.Н. Бытовые холодильники (устройство и ремонт) : учеб. пособие. Москва : Легкая индустрия, 1974. 205 с.

6. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов. Москва : Высш.школа, 1980. 469 с.

7. Доссат Рой Дж. Основы холодильной техники : учебник. Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1984. 520 с.

8. APM FEM Система прочностного анализа для КОМПАС-3D. URL : http://www.apm.ru.

9. Кашкаров А.П. Автомобильные кондиционеры. Установка, обслуживание, ремонт. Москва : ДМК Пресс, 2012. 112 с.

Ostroverkh O.O. RESEARCH OF THE USE OF AXIAL PISTON COMPRESSORS IN AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING SYSTEMS

Air conditioning compressors are displacement superchargers. For their lubrication, special refrigeration oil is used, half of which remains in the compressor and the rest is distributed throughout the refrigerant circuit. At the inlet, the compressor sucks gaseous refrigerant with low pressure through the evaporator and then pushes it into the high pressure circuit. The gaseous state of the refrigerant is "technically necessary" for the compressor, as the liquid refrigerant can be compressed, which can cause the destruction of the compressor. Due to the fact that modern automobiles use unregulated compressors, which do not have a long service life, an axial piston compressor with an inclined rotating disc is used as an upgrade. The rotation of its drive shaft by means of an inclined disk is converted into reciprocating motion of the pistons of the cylinders. Depending on the design, there can be from 3 to 10 pistons that move in parallel with the drive shaft. Each piston corresponds to an inlet valve, which opens according to the compressor duty cycle. The air conditioning system is designed for the maximum speed of the compressor. The performance of the compressor is determined by the speed of rotation of the crankshaft, which is from 0 to 6000 rpm.

During the study of the axial piston compressor, the strength of the hollow piston used in the proposed compressor with an angled washer has been calculated using the software environment COMPASS 3D V16.

The APM FEM system ("Automated Machine Design") is used as a calculation program, which is a tool for preparation and subsequent finite element of a three-dimensional solid model integrated in KOMPAS-3D. Aluminium and steel have been used as materials in the calculation.

The results according to the calculated data of the piston made of aluminium and steel alloy are summarized. One of the advantages of the aluminium piston is a halved mass, which entails a reduction in inertial masses. In terms of strength, both pistons are within acceptable limits but when using steel, the coefficient of strength is almost twice as high. As a result, we get two different pistons suitable for use in the axial piston compressor with an angled washer in the automotive air conditioning system.

Key words: *automobile, installation, axial piston compressor, piston.*