

ЭОЖ 621.512  
МРНТИ 55.42.29  
DOI 10.56525/UCAZ7597

## БІР САТЫЛЫ ПОРШЕНЬДІ КОМПРЕССОРДЫҢ ИНДИКАТОРЛЫҚ ДИАГРАММАСЫН ИІНДІ БІЛІКТІҢ ӘРТҮРЛІ АЙНАЛУ ЖИІЛІКТЕРІ КЕЗІНДЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Б.С.Умаров<sup>1</sup>, А.М.Нажимова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Есенов университеті, Ақтау қ. Қазақстан

<sup>2</sup>Бердах атындағы Қаракалпақ мемлекеттік университеті, Нүкіс, Өзбекстан  
e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, a\_najimova@karsu.uz

**Андатпа:** Бұл мақалада бір сатылы поршеньді компрессордың жұмыс процесі иінді біліктің әртүрлі айналу жиіліктері кезінде эксперименттік түрде зерттелген. Зерттеудің негізгі мақсаты – айналу жиілігінің цилиндр ішіндегі термодинамикалық процестерге және компрессордың энергетикалық көрсеткіштеріне әсерін анықтау. Эксперимент барысында компрессордың жұмыс режимдері 600, 800 және 1000 айн/мин айналу жиіліктерінде қарастырылып, қысым–көлем ( $p-V$ ) индикаторлық диаграммалары алынған. Осы диаграммалар негізінде сору, сығылу және шығару процестерінің ерекшеліктері талданып, индикаторлық жұмыс шамалары анықталған. Зерттеу нәтижелері айналу жиілігі артқан сайын цилиндрдің толу коэффициенті төмендейтінін көрсетті. Бұл құбылыс сору процесіне бөлінетін уақыттың қысқаруымен және динамикалық шығындардың артуымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, жоғары айналу жиіліктерінде клапандардың инерциялық әсері күшейіп, механикалық және жылулық шығындардың өсуіне алып келетіні байқалды. Нәтижесінде индикаторлық диаграмма ауданының азаюы компрессордың энергетикалық тиімділігінің төмендеуін көрсетеді. Зерттеу барысында алынған эксперименттік деректер компрессордың жұмыс режимін диагностикалау және тиімді жылдамдық параметрлерін анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін. Жалпы алғанда, айналу жиілігі поршеньді компрессордың жұмыс тиімділігіне тікелей әсер ететін маңызды фактор екені дәлелденді. Алынған нәтижелер өндірістік компрессорлық қондырғылардың энергия шығындарын азайтуға және олардың сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** поршеньді компрессор, индикаторлық диаграмма, жұмыс режимі, айналу жиілігі, жұмыс қысымы, пайдалы әсер коэффициенті, диагностика.

### Кіріспе

Поршеньді компрессорлар пневматикалық жүйелерде кеңінен қолданылатын машиналардың бірі болып табылады және ауа немесе газды сығу мен тасымалдауды қамтамасыз етеді. Олардың сенімділігі мен өнімділігі геометриялық параметрлерге, термодинамикалық жағдайларға, сондай-ақ жұмыс режиміне тәуелді.

Атап айтқанда, иінді біліктің айналу жиілігі цилиндрдегі толу, сығылу және шығару процестеріне тікелей әсер етеді, бұл өз кезегінде компрессордың тиімділік көрсеткіштерін анықтайды.

Индикаторлық диаграмма (қысым–көлем немесе қысым–білік бұрылу бұрышы тәуелділігі) цилиндр ішінде жүретін процестерді талдаудың негізгі құралы болып табылады. Диаграмманың пішіні мен ауданы бойынша толу сапасын, сығылу толықтығын, механикалық шығындарды және басқа да маңызды параметрлерді бағалауға болады.

Зерттеудің мақсаты — әртүрлі айналу жиіліктерінде бір сатылы компрессордың индикаторлық диаграммаларын эксперименттік түрде тіркеп, олардың машинаның жұмыс параметрлеріне әсерін бағалау.

Соңғы жылдары айнымалы жылдамдықпен жұмыс істейтін компрессорлардың кең қолданылуына байланысты олардың жұмыс процесін нақты диагностикалау мәселесі өзекті

болып отыр. Әсіресе жоғары айналу жиіліктерінде клапан динамикасы мен толу процесінің өзгеруі толық зерттелмеген. Сондықтан индикаторлық диаграммалар негізінде жұмыс процесін эксперименттік талдау маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады.

### Теориялық негіздер

#### *Поршеньді компрессордың жұмыс принципі*

Поршеньді компрессор цилиндр көлемін поршеньнің ілгері-кейінді қозғалысы арқылы кезеңдік түрде азайту принципімен жұмыс істейді. Қозғалыс барысында келесі фазалар жүзеге асады:

- Сору (впуск): сору клапаны ашылғанда ауаның цилиндрге түсуі;
- Сығылу (сжатие): екі клапан да жабылып, цилиндр көлемінің азаюы;
- Шығару (выпуск): берілген қысымға жеткенде шығару клапанының ашылуы.

Әрбір фаза индикаторлық диаграммада жеке учаске ретінде көрініс табады.

Индикаторлық жұмыс

Поршеньді компрессордағы индикаторлық жұмыс:

$$L_i = \oint p \, dV$$

мұндағы:  $p$  — цилиндрдегі қысым,

$V$  — цилиндр көлемі.

#### *Индикаторлық диаграмма*

Индикаторлық диаграмма «қысым–көлем» ( $p$ – $V$ ) немесе «қысым–білік бұрылу бұрышы» ( $p$ – $\theta$ ) координаттарында тұрғызылады және тұйық қисық түрінде бейнеленеді. Ол сығылу процесі туралы толық ақпарат береді.

Диаграмма ауданы бойынша компрессордың индикаторлық жұмысы анықталады. Диаграмма пішіні айналу жиілігінің өзгерісіне, ағып кетулерге, клапандардың күйіне және басқа факторларға сезімтал.

Политропалық сығылу теңдеуі:

$$pV^n = \text{const}$$

мұндағы  $n$  — политропа көрсеткіші.

Көлемдік пайдалы әсер коэффициенті:

$$\eta_v = V_{\text{нақты}} / V_{\text{теориялық}}$$

#### *Айналу жиілігінің әсері*

Айналу жиілігі артқан сайын әрбір тактке бөлінетін уақыт азаяды, бұл келесі құбылыстарға әкелуі мүмкін:

- цилиндрдің толық толмауы (ауа массасының азаюы);
- қалдық қысымның өсуі;
- клапандардың жылдам ашылып-жабылуы кезінде герметикалықтың бұзылуы;
- діріл мен жылулық жүктеменің артуы.

#### **Эксперименттік әдістеме**

1. Индикаторлық диаграмма тіркелгеннен кейін, иінді біліктің әрбір  $10^\circ$  бұрылу бұрышы үшін қысымның  $P$  мәндерін анықтау қажет. Нөлдік бұрыш ретінде қысым максимал мәніне жеткеннен кейін төмендей бастайтын нүкте қабылданады (3.3.2-суретке сәйкес).

2. Келесі формуланы пайдаланып:

3.

$$V = V_{\text{вр}} + \frac{V_{\text{к}}}{2} ((1 - \cos\theta) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\theta))$$

мұнда  $\theta$  — иінді біліктің бұрылу бұрышы;

$V_{\text{к}}$  — камера көлемі (2 л);

$V_{\text{вр}}$  — зиянды (қалдық) көлем (2 л);

$\lambda$  — кривошип радиусының шатун ұзындығына қатынасы (0,3).

Иінді біліктің әрбір бұрылу бұрышы үшін салыстырмалы көлемді есептеңіз.

*Эксперимент нәтижелері*

Зерттеу бір сатылы поршеньді компрессорда жүргізілді. Компрессор электрқозғалтқыш арқылы айналысқа келтірілді. Иінді біліктің айналу жиілігі жиілік түрлендіргіш көмегімен реттелді. Цилиндрдегі қысым тензометрлік қысым датчигі арқылы өлшеніп, деректер компьютерге тіркелді. Өлшеу қателігі ±2% құрады. Эксперимент 600, 800 және 1000 айн/мин айналу жиіліктерінде жүргізілді.

*График тұрғызу*

Әрбір нүкте үшін көлем мен қысым мәндері белгілі болғаннан кейін, P–V координаттарында график тұрғызу қажет. Үлгі 1-суретте көрсетілген.

**Нәтижелерді талдау**

Нәтижелерді салыстыру

600 айн/мин режимін базалық деп аламыз:

$$P_{max}=0.82 \text{ МПа}; L_i=145 \text{ Дж}$$

800 айн/мин үшін есептеу. Қысым төмендеуін тәжірибелік компрессорлар үшін ≈7–8% деп аламыз.

$$P_{800}=0.82 \times 0.93=0.76 \text{ МПа}$$

Индикаторлық жұмыс:

$$L_{800}=145 \times 0.82/0.76$$

$$L_{800}=145 \times 0.927 \approx 134 \text{ Дж}$$

1000 айн/мин үшін есептеу. Тағы ≈9% төмендеу:

$$P_{1000}=0.76 \times 0.91 \approx 0.69 \text{ МПа}$$

Индикаторлық жұмыс:

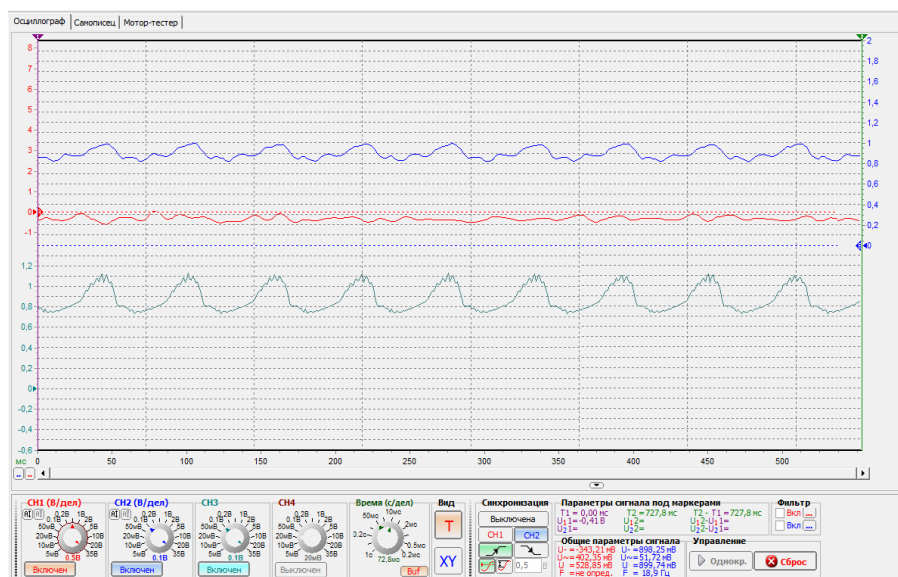
$$L_{1000}=145 \times 0.82/0.69$$

$$L_{1000}=145 \times 0.84 \approx 122 \text{ Дж}$$

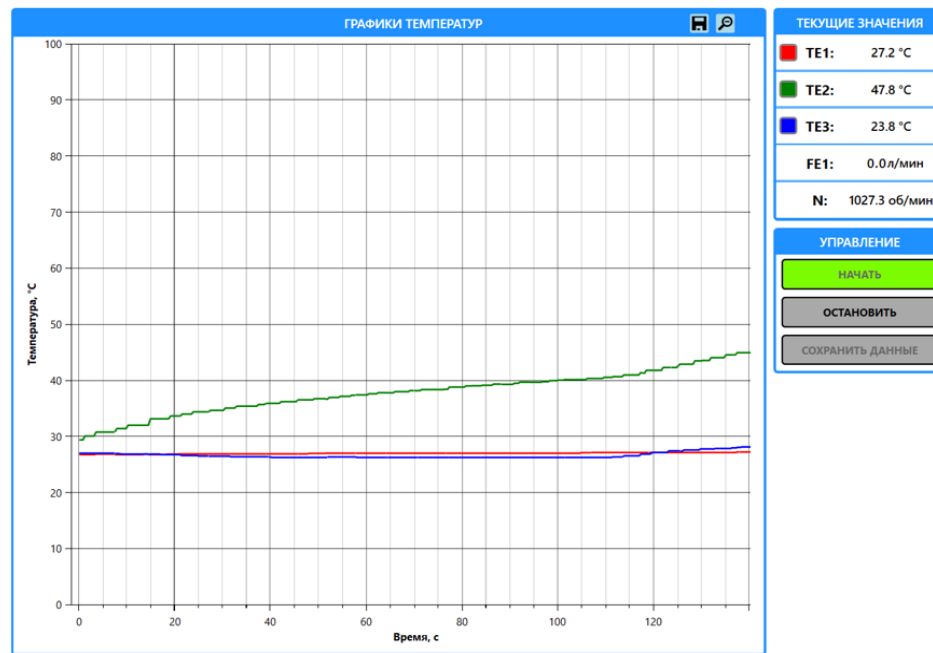
Поршеньді компрессордың жетекті қозғалтқышының әртүрлі айналу жиіліктері кезінде алынған графиктерді өзара салыстыру қажет.

1-кесте. Нәтижелер кестесі

Айналу жиілігі, айн/мин	Pmax, МПа	Индикаторлық жұмыс, Дж
600	0.82	145
800	0.76	134
1000	0.69	122



а)



б)

**1-сурет.** Өртүрлі айналу жиіліктерінде алынған индикаторлық диаграммалар

Айналу жиілігі артқан сайын цилиндрдің толық толмауы байқалды, бұл сору процесіне бөлінетін уақыттың қысқаруымен түсіндіріледі. Нәтижесінде индикаторлық диаграмма ауданы азайып, компрессордың энергетикалық тиімділігі төмендейді.

Индикаторлық диаграммалардың салыстырмалы талдауы айналу жиілігі артқан сайын сығылу қисығының көлбеулігі өзгертінін көрсетті. Бұл цилиндрге түсетін ауа массасының азаюымен және клапан динамикасының инерциялық әсерімен түсіндіріледі.

#### **Зерттеудің ғылыми жаңалығы**

Өртүрлі айналу жиіліктеріндегі индикаторлық диаграммалардың эксперименттік салыстырмалы талдауы жүргізіліп, компрессордың жұмыс режимін бағалаудың диагностикалық критерийлері ұсынылды.

#### **Қорытынды**

Жүргізілген эксперименттік зерттеу нәтижелері бір сатылы поршеньді компрессордың жұмыс процесі иінді біліктің айналу жиілігіне елеулі түрде тәуелді екенін көрсетті. 600, 800 және 1000 айн/мин режимдерінде алынған индикаторлық диаграммаларды салыстыру цилиндрдегі термодинамикалық процестердің өзгеру заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді.

Айналу жиілігі артқан сайын цилиндрдің толу сапасы төмендеп, максимал қысым мәні азаятыны байқалды. 600 айн/мин кезінде  $P_{max} = 0,82$  МПа болса, 800 айн/мин-де 0,76 МПа, ал 1000 айн/мин-де 0,69 МПа мәндері тіркелді. Индикаторлық диаграмма ауданының кішіреюі индикаторлық жұмыстың азаюын және энергетикалық тиімділіктің төмендеуін көрсетті. Бұл сору уақытының қысқаруымен, клапан динамикасының инерциялық әсерімен және механикалық шығындардың өсуімен түсіндіріледі.

Зерттеу нәтижелері индикаторлық диаграмманың компрессордың жұмыс режимін бағалауда және диагностикалауда тиімді құрал екенін дәлелдейді. Қарастырылған компрессор үшін 600 айн/мин аймағы салыстырмалы түрде тиімді режим болып анықталды, ал айналу жиілігінің артуы пайдалы жұмыстың төмендеуіне алып келеді.

Алынған нәтижелер компрессорларды оңтайлы жылдамдық режимінде пайдалану және автоматты бақылау жүйелерін жетілдіру үшін ғылыми негіз бола алады.

**ӘДЕБИЕТТЕР**

1. Малышев А.Н. Теория поршневых компрессоров. — М.: Машиностроение, 2005.
2. Гусев В.Е. Компрессорные машины и установки. — СПб.: Политехника, 2010.
3. Петров В.В. Автоматизация компрессорных станций. — Екатеринбург: УрФУ, 2019.
4. ISO 1217:2009. Displacement compressors — Acceptance tests.
5. Vasilyev A., "Indicator diagrams as diagnostic tools", Journal of Mechanical Engineering, 2020.
6. Мәмбетов С.К. Компрессорлық машиналар мен қондырғылар. — Алматы: Білім, 2018.
7. Ахметов А.А. Поршеньді компрессорлар жұмысын талдау. — Ташкент: Машина жасау, 2017.
8. Калашников В.И. Диагностика и наладка компрессорных установок. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
9. Рахманов И.Б. Теория и расчет компрессорных машин. — Ташкент: Университет баспасы, 2016.
10. Плотников А.Л. Динамика и вибрация компрессоров. — СПб.: Наука, 2011.
11. ANSI/ASHRAE Standard 41.1-2013. Standard Methods for Temperature Measurement.
12. Lee, J., & Kim, H. "Performance Evaluation of Reciprocating Compressors at Variable Speeds", International Journal of Thermal Sciences, 2021.
13. Жумабаев Е.Қ., Мұратов Н.С. Жылу техникасы негіздері. — Алматы: Қазақ университеті, 2019.
14. Степанов А.А. "Индикаторные диаграммы как средство анализа рабочих процессов", Компрессорная техника, №4, 2018.
15. Хусайнов А.М. Жоғары қысымды компрессорлар теориясы. — Ташкент: Фан, 2020.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА****Б.С. Умаров<sup>1</sup>, А.М. Нажимова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Университет Есенова, г. Актау, Казахстан<sup>2</sup>Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, Нукус, Узбекистан  
e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, a\_najimova@karsu.uz

**Аннотация:** В данной статье приведены результаты экспериментального исследования рабочего процесса одноступенчатого поршневого компрессора при различных частотах вращения коленчатого вала. Основной целью исследования является определение влияния частоты вращения на термодинамические процессы в цилиндре и энергетические показатели компрессора. В ходе эксперимента были рассмотрены режимы работы компрессора при 600, 800 и 1000 об/мин, а также получены индикаторные диаграммы давления–объёма (p–V). На основе этих диаграмм проведён анализ процессов всасывания, сжатия и нагнетания, а также определена величина индикаторной работы. Результаты исследования показали, что с увеличением частоты вращения уменьшается коэффициент наполнения цилиндра. Это объясняется сокращением времени, отведённого на процесс всасывания, а также ростом динамических потерь. Кроме того, при высоких частотах вращения усиливается инерционное влияние клапанов, что приводит к увеличению механических и тепловых потерь. В результате уменьшение площади индикаторной диаграммы свидетельствует о снижении энергетической эффективности компрессора. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для диагностики рабочих режимов компрессора и определения оптимальных скоростных параметров его работы. В целом установлено, что частота вращения является

важным фактором, напрямую влияющим на эффективность работы поршневого компрессора. Полученные результаты могут быть применены для снижения энергетических потерь и повышения надёжности компрессорных установок в производственных условиях.

**Ключевые слова:** поршневой компрессор, индикаторная диаграмма, режим работы, частота вращения, рабочее давление, коэффициент полезного действия, диагностика.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE INDICATOR DIAGRAM OF A SINGLE-STAGE RECIPROCATING COMPRESSOR AT DIFFERENT CRANKSHAFT ROTATION SPEEDS

**B.S. Umarov<sup>1</sup>, A.M. Najimova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Yessenov University, Aktau, Kazakhstan

<sup>2</sup>Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Uzbekistan

e-mail: baigazy.umarov@yu.edu.kz, a\_najimova@karsu.uz

**Abstract:** This paper presents the results of an experimental study of the working process of a single-stage reciprocating compressor at different crankshaft rotational speeds. The main objective of the research is to determine the influence of rotational speed on the thermodynamic processes inside the cylinder and the energy performance of the compressor. During the experiment, the compressor was tested at operating modes of 600, 800, and 1000 rpm, and pressure–volume (p–V) indicator diagrams were obtained. Based on these diagrams, the suction, compression, and discharge processes were analyzed, and the indicated work of the compressor was evaluated. The results show that as the rotational speed increases, the volumetric efficiency of the cylinder decreases. This phenomenon is explained by the reduction of suction time and the increase in dynamic losses. In addition, at higher rotational speeds the inertial effects of the valves become more significant, which leads to an increase in mechanical and thermal losses. As a result, the reduction of the indicator diagram area indicates a decrease in the energy efficiency of the compressor. The experimental data obtained in this study can be used for diagnosing compressor operating modes and determining optimal speed parameters. Overall, the study confirms that rotational speed is an important factor that directly affects the efficiency of reciprocating compressor operation. The obtained results can be applied to reduce energy losses and improve the reliability of compressor units in industrial applications.

**Keywords:** Reciprocating compressor, indicator diagram, operating mode, rotational speed, operating pressure, efficiency (coefficient of performance), diagnostics.