

### ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО КОЕФІЦІЄНТУ КОРИСНОЇ ДІЇ ТЕПЛОЇ МАШИНИ У ВИПАДКУ ЇЇ ЧАСТКОВОГО ЖИВЛЕННЯ СОНЯЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ

**М. О. Єлізаров, О. І. Єлізаров, О. В. Сукачев**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: [yel@bigmir.net](mailto:yel@bigmir.net)

Від використання невідновлюваних джерел енергії сучасна цивілізація дедалі більше переходить до використання відновлюваних. Генератори енергії тепер працюють або від одних джерел, або від других. Проте двигуни зовнішнього згорання (двигуни Стірлінга, наприклад) можуть, в принципі, житися від двох різних джерел одночасно. Щоб експериментально підтвердити це, було досягнуто роботу двигуна Стірлінга в зазначеному режимі. Для цього його теплоприймач був перероблений так, що міг одночасно сприймати енергію електронагріву та променевої енергії. Показано, що одночасне живлення двигуна від невідновлюваних і відновлюваних джерел енергії дозволяє суттєво збільшити ефективність використання невідновлюваної енергії. Для кількісної характеристики цієї ефективності введено ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна, який є відношенням корисної його роботи до спожитої невідновлюваної енергії.

**Ключові слова:** тепла машина, двигун Стірлінга, сонячна енергія, коефіцієнт корисної дії.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОЙ МАШИНЫ В СЛУЧАЕ ЧАСТИЧНОГО ПИТАНИЯ ЕЕ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

**М. А. Елизаров, А. И. Елизаров, А. В. Сукачев**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: [yel@bigmir.net](mailto:yel@bigmir.net)

От использования невозобновляемых источников энергии современная цивилизация все более переходит к использованию возобновляемых. Генераторы энергии теперь работают либо от одних источников, либо от других. Однако двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга, например) могут, в принципе, питаться от двух разных источников одновременно. Для экспериментального подтверждения этого двигатель Стирлинга работал в упомянутом режиме. Для этого его теплоприемник был переделан так, что мог одновременно принимать энергию электронагрева и энергию излучения. Показано, что при одновременном питании двигателя от возобновляемого и невозобновляемого источника существенно увеличивается эффективность использования невозобновляемой энергии. Как количественная характеристика этой эффективности введен эффективный коэффициент полезного действия двигателя, равный отношению полезной его работы к потребленной невозобновляемой энергии.

**Ключевые слова:** тепловая машина, двигатель Стирлинга, солнечная энергия, коэффициент полезного действия.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Залежність сучасної цивілізації від *штучно* виробленої енергії та обмеженість ресурсів органічного палива стимулюють широкомасштабні розробки пристроїв, що генерують зручні для використання людиною форми енергії, перш за все, електричну, працюючи від відновлюваних джерел енергії, – сонячної, вітрової, енергії річок і біопалива [1]. Альтернативи саме такому шляху розвитку за великим рахунком немає. Справді, атомна енергетика також обмежена запасами важких радіонуклідів, до того ж здатна, хоч і зрідка, приносити людуству крупномасштабні екологічні біди (Чорнобиль, Фукусіма).

Досі задовільно не розв'язано і питання накопичення атомними реакторами радіоактивних відходів. Майже неймовірним виглядає здійснення керованого термоядерного синтезу легких ядер, що міг би стати основою термоядерної енергетики. Хронічні невдачі приборкати гарячу плазму і одержати керувану самопідтримувану реакцію синтезу легких ядер свідчать про існування істотних обмежень технічного характеру, які не дозволяють в земних умовах досягти бажаного результату [2]. Тож, скоріше за все, міжнародний проект ІТЕР побудови орієнтовно у 2019 р. [3] діючого термоядерного реактору, як і багато попередніх, успіху мати не буде.

Оцінюючи несприятливі перспективи продукування енергії усталеними способами, Євросоюз націлює енергетичну політику на суттєво ширше використання відновлюваних джерел енергії – Сонця, вітру, біопалива. Передбачається, що у 2020 р. країни Євросоюзу мають виробити 20 % споживаної енергії, використовуючи відновлювані джерела енергії. При цьому структура нової генеруючої енергетики розуміється так, як це умовно показує схема А рис. 1, тобто, один з п'яти генераторів, що працюють від невідновлюваних джерел енергії, буде замінений генератором, який працюватиме від вітру, Сонця чи біопалива.

Але, на нашу думку, можлива і принципово інша схема генерування енергії, яка, не заперечуючи першу схему, могла б корисно її доповнити (рис. 1, схема Б). Її суть полягає в тому, що генератор електричної енергії працює від силового агрегату, що здатен одночасно житися від різних джерел енергії – частково від невідновлюваних, а частково від відновлюваних. При цьому співвідношення часток цих видів енергії в процесі роботи силової установки могло б змінюватися в широких межах. Ці зміни обумовлюють конкретні умови роботи агрегату, наприклад, сонячний день чи ніч.

Можливість реалізувати таку схему дає двигун зовнішнього згорання – двигун Стірлінга. Сконструйований ще у 19 сторіччі, він довгий час був певною екзотикою серед інших теплових машин і не

дістав поширення. Особливості його роботи – недоліки і переваги проти інших теплових машин – розглянуті в [4].

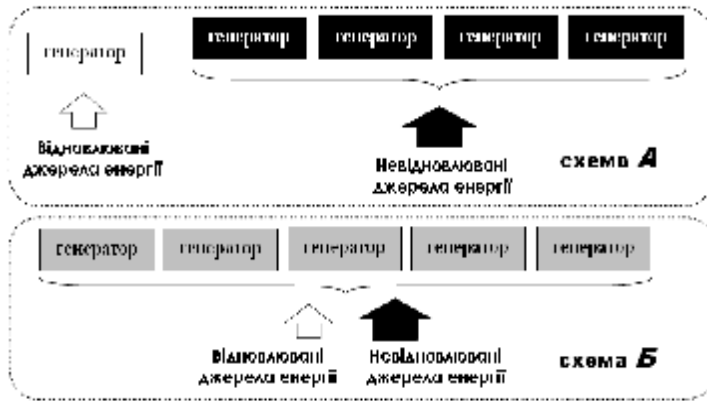


Рисунок 1 – Схеми впровадження відновлюваних джерел у генеруючу енергетику: А – та, що планується; Б – як можлива в доповнення до першої

Останніми роками спостерігається чималий інтерес до цього двигуна у зв'язку з практично безпосереднім перетворенням сонячної енергії на механічну і далі на електричну. В США вже побудовані дослідні геліоелектричні станції великої потужності. Принцип їх роботи полягає в тому, що велике параболічне дзеркало фокусує променеву енергію Сонця на теплоприймач двигуна Стірлінга. Повідомляється, що к.к.д. таких установок відчутно більший від к.к.д. панелей напівпровідникових сонячних елементів [5].

З іншого боку, саме двигун Стірлінга після певних конструктивних змін теплового приймача може бути силовим агрегатом з одночасним комбінованим живленням з відновлюваних і невідновлюваних

джерел енергії, що, на наш погляд, дозволить суттєво економити паливо органічного походження.

Мета роботи – реалізувати схему паралельного живлення двигуна Стірлінга від джерел відновлюваного і невідновлюваного палива і дослідити залежність к.к.д. такого двигуна від співвідношення часток споживаної двигуном указаних форм енергії.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** У своїх експериментах ми використовували учбово-демонстраційний двигун Стірлінга УДС-1. Його теплоприймач був перероблений так, що міг сприймати енергію як безпосереднього електричного нагріву (джоулева теплота), так і променеву енергію (рис. 2).

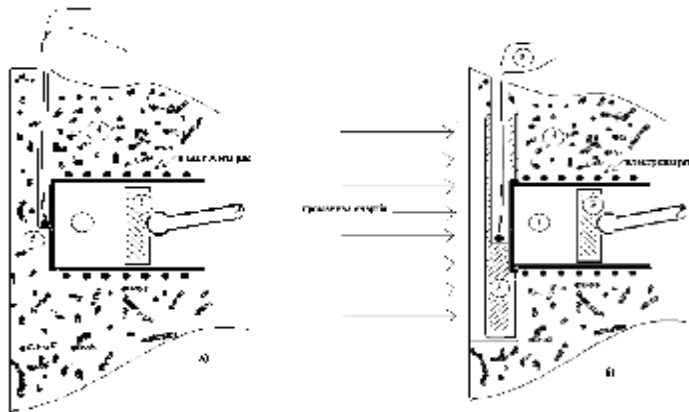


Рисунок 2 – Схеми теплоприймача двигуна Стірлінга, які використовувались в дослідженні параметрів його роботи: а) за умови роботи лише від одного джерела (електронагріву), б) за умови комбінованого живлення – електронагрів і нагрів світлом; тут 1 – робочий циліндр; 2 – поршень; 3 – диск-теплоприймач променевої енергії; 4 – теплоізолятор; 5 – термопара

Джерелом променевої енергії була інфрачервона лампа розжарювання потужністю 250 Вт. У наших дослідах ця лампа відігравала роль джерела дарової, тобто не виробленої штучно енергії – енергії Сонця. (Біопаливо, хоч його й справедливо відносять до відновлюваних джерел енергії, не можна назвати джерелом дарової енергії, адже на його виготовлення була теж затрачена енергія – наприклад, оранка землі для посіву ріпака, його вирощування, переробка на етанол. Ці затрати можуть бути більші чи менші залежно від видів одержуваного біопалива, наприклад одержання біогазу з гною тваринницьких ферм, водоростей чи зі звалищ сміття). Лампа мала відбивач світла переважно в один бік, але його потік був досить розсіяним і немала частка випромінювання на диск-теплоприймач не потрапляла. У даному випадку це не мало принципового значення, оскільки обробка результатів дослідів ґрунтувалась на відносних показниках потужності лампи і електронагрівача.

Частота обертів двигуна контролювалась оптично пов'язаною з маховиком двигуна. Температура циліндра і диска-приймача вимірювалась термопарою, місце розташування якої показано на рис. 2. Потужність джерел енергії – лампи й електроспіралі – контролювалась ватметрами.

З рис. 5 видно, що двигун починає обертатися при температурі циліндра приблизно 400 К, або 130 °С.

При цьому у першому наближенні ми вважали, що справжня кількість теплоти, яка передавалась на циліндр двигуна, складала певні частки від потужності джерел живлення, і ці частки не залежали від значень потужності джерел.

Результати досліджень представлені на рис. 3–5. На першому з них продемонстровані залежності числа обертів двигуна від енергії джерел живлення за різних умов передачі теплоти на його робочий циліндр. Крива 1 на рис. 3 відповідає умовам роботи двигуна по схемі (а) рис. 2, тобто без диска-теплоприймача променевої енергії і живлення від однієї спіралі. Крива 2 на рис. 3 теж відповідає живленню лише від електроспіралі, але за наявності диска-приймача променевої енергії (схема (б) рис. 2). І, нарешті, крива 3 на рис. 3 показує залежність частоти обертів двигуна від потужності лампи. При цьому на електроспіралі подавалась стала потужність нагріву, а саме  $\approx 69$  Вт, яка відповідає роботі по доланню сил опору і початку роботи двигуна на мінімальних обертах. На рис. 4 показані співвідношення потужностей електронагріву і лампи, що мають місце при сталому значенні числа обертів двигуна, а саме:  $f = 256 (\text{хв})^{-1}$ .

тужності нагріву спіралі (крива 1, рис. 3) свідчить про хорошу передачу теплоти на циліндр двигуна.

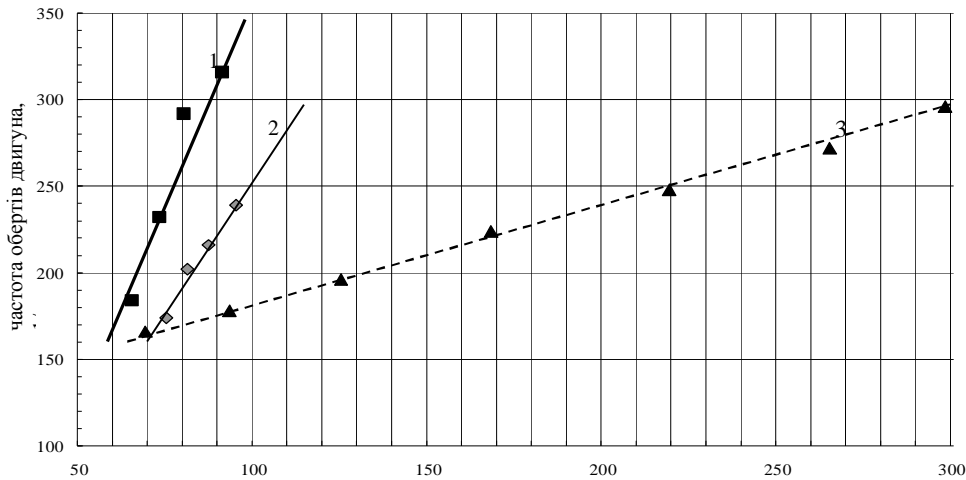


Рисунок 3 – Залежність числа обертів двигуна від потужності нагріву: 1 – нагрів тільки спіраллю зі знятим диском-теплоприймачем; 2 – нагрів тільки спіраллю, але з надітим диском-теплоприймачем; 3 – нагрів спіраллю (потужність стартового нагріву 69 Вт для початку роботи двигуна) + змінною потужністю лампи

Електроспіралі забезпечує нагрів до такої температури, споживаючи потужність приблизно 60 Вт. З наростанням потужності нагріву самою спіраллю частота обертів починає стрімко зростати і досягає значення 320 об/хв., що відповідає температурі циліндра близько 440 К, або 170 °С (рис. 3, крива 1; рис. 5). Стрімкість зростання частоти обертів від збільшення по-

Приєднання до циліндра диска-приймача променевої енергії погіршує цю передачу, оскільки диск частину джоулевого нагріву забирає на власне нагрівання із дальшим розсіюванням цієї теплоти в простір. Про це свідчить зменшення кута нахилу прямої 2 порівняно з прямою 1 (рис. 3). Нарешті, суттєво менший кут нахилу прямої 3 (рис. 3) свід-

чить, що передача теплоти від лампи через опромінення нею диска була малоефективна. Це означає, що в наших дослідях лівова частка енергії лампи розсіювалась у навколишнє середовище за рахунок її власного нагрівання і виникаючої навколо неї конвекції, і лише незначна частина у вигляді променевої енергії потрапляла на диск.

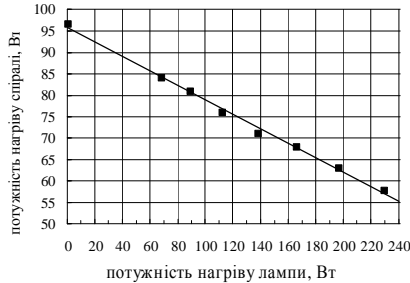


Рисунок 4 – Залежність між потужностями нагріву спіралі і лампи за умови сталої частоти обертів двигуна ( $f = 256$  1/хв)

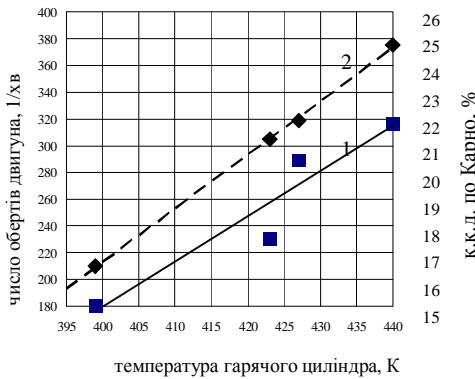


Рисунок 5 – Залежність числа обертів двигуна (1) та к.к.д. по Карно (2) від температури гарячого циліндра

Але не ефективність передачі енергії з її джерел на циліндр двигуна є предметом дослідження цієї роботи. Лампа лише відіграла роль дарового джерела енергії, наприклад, енергії Сонця. Дія такого джерела зменшує витрати енергії на живлення двигуна з невідновлюваного джерела палива (електроспіралі), що свідчить рис. 4, який показує залежність потужності спіралі, потрібної на підтримання сталої частоти обертів двигуна, від потужності лампи. Видно, що залучення лампи як додаткового джерела живлення двигуна Стірлінга дозволило зменшити потужність електроспіралі майже на половину.

Отже, можна вести мову про можливість суттєвої економії палива при одночасному живленні двигуна з двох джерел енергії, одне з яких є даровим.

У зв'язку з цим, вдаючись до кількісних показників, що характеризують роботу двигуна за таких умов, варто ввести поняття ефективного коефіцієнта

корисної дії теплової машини –  $\kappa.к.д._{ef}$ , який би відбивав не лише ступінь перетворення кількості теплоти на роботу, а і свідчив про здатність машини залучати до своєї роботи енергію з відновлюваних джерел і таким чином економити паливо. У такому розумінні  $\kappa.к.д._{ef}$  може бути записаний як відношення

$$\kappa.к.д._{ef} = \frac{A}{Q_{невідновл}}$$

тут  $A$  – отримана робота,  $Q_{невідновл}$  – кількість теплоти, наданої машині з невідновлюваних джерел енергії. Оскільки  $Q_{невідновл}$  є частиною  $Q_{невідновл}$  загальної кількості теплоти  $Q$ , спожитої машиною, тобто  $Q_{невідновл} = a_{невідновл} Q$ , і тоді

$$\kappa.к.д._{ef} = \frac{A}{a_{невідновл} Q} = \frac{\kappa.к.д.}{a_{невідновл}}$$

где  $\kappa.к.д. = \frac{A}{Q}$  коефіцієнт корисної дії теплової машини у звичайному розумінні цього поняття.

Зрозуміло, що  $a_{невідновл}$  може, у принципі, змінюватися від 0 (двигун працює виключно на даровій енергії), до 1 (двигун працює виключно на паливі з невідновлюваних джерел). У першому випадку  $\kappa.к.д._{ef} = \infty$  і ми маємо справу зі своєрідним *perpetuum mobile* першого роду, адже він працює без поглинання палива, добутого людиною. Він перетворює, хай і частково, на роботу променевої енергії Сонця, надходження якої для землян є практично вічним. У другому випадку  $\kappa.к.д._{ef} = \kappa.к.д.$ , і ми повертаємося до звичайної теплової машини. Графічно взаємозв'язок між  $\kappa.к.д._{ef}$  і  $a_{невідновл}$  показано на рис. 6.

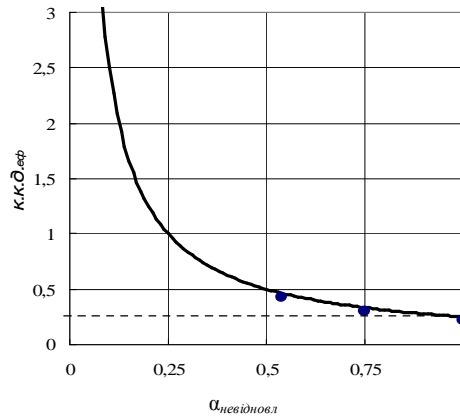


Рисунок 6 – Залежність  $\kappa.к.д._{ef}$  від частки палива з невідновлюваних джерел енергії  $a_{невідновл}$ : суцільна крива – теоретичний розрахунок, в якому параметром кривої вибрано  $\kappa.к.д.$  теплової машини рівним 0,25; точки – експеримент

Повертаючись до конкретики наших дослідів, надамо ту ж саму залежність, яку ми отримали в наближенні теоретичного підрахованого максимально можливого  $\kappa.к.д.$  – коефіцієнта Карно за умов

роботи двигуна, які представлені вище на рис. 4 і 5. К.к.д. за Карно підраховувався за відомою формулою Карно:

$$\kappa.к.д._{\max} = \frac{T_n - T_x}{T_n},$$

где  $T_n$ ,  $T_x$  – температури нагрівача (гарячого циліндра) і охолоджувача (холодного циліндра).

Остання в наших дослідках була близькою до 330К. З рис. 6 видно, що навіть за умови технічно недосконалої подачі променевої енергії на теплопріймач двигуна його ефективний к.к.д. збільшується вдвічі.

**ВИСНОВКИ.** У лабораторних умовах здійснено одночасне живлення двигуна Стірлінга двома незалежними джерелами енергії, одне з яких еквівалентне невідновлюваному виду палива, а друге – відновлюваній променевої енергії Сонця.

Досліджено параметри роботи двигуна залежно від співвідношення потужностей цих джерел.

Введено поняття ефективного коефіцієнта корисної дії теплової машини  $\kappa.к.д._{ef}$ , який відбиває не лише ступінь перетворення кількості теплоти на роботу, а і свідчить про здатність машини залучати

до своєї роботи енергію з відновлюваних джерел і таким чином економити паливо.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України) / Ришард Титко, Володимир Калініченко; Об-ня шкіл електричних № 1, Полтав. держ. аграр. акад. – Варшава, Краків, Полтава: OWG, 2010. – 533 с.
2. Елизаров А.И. Управляемый термоядерный синтез (анализ проблематики) // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2/2003 (19), Т. 3.
3. <http://www.iter.org/proj/iterandbeyond> (офіційний сайт ІТЕР).
4. Черепанов В.П. Машини Стирлинга – энергосбережение и экологические проблемы // Вісник Кременчуцького національного університету. – 2011. – Вип. 3/2011 (68), част. 1.
5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2008/solargrid.html>/ (офіційний сайт Sandia National Laboratories).

**Отформатировано:** Отступ: Слева: 0 см, Первая строка: 0,5 см, Поз.табуляции: 0 см, Выворачивать по позиции табуляции + 1 см, по левому краю

#### ON THE REAL EFFICIENCY COEFFICIENT OF A HEAT ENGINE WHEN ITS PARTIAL SOLAR POWER SUPPLY

A. Elizarov, M. Yelizarov, A. Sukachov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: [yel@bigmir.net](mailto:yel@bigmir.net)

The modern civilization becomes more and more biased towards use of the renewable energy resources instead of the non-renewable ones. The power generators is now working whether from one source type or another. However, the external combustion engines (e.g. Stirling engines) may be powered from both resource types simultaneously. For experimental verifying of this fact we made a Stirling engine run in such a mode. The engine's heat receiver had been rebuilt for supply from both the electric heating and solar radiation sources. It is shown, that simultaneous engine supply from renewable and non-renewable energy sources enhances significantly the efficiency of non-renewable fuel. As its quantitative characteristic of the efficiency of non-renewable energy using the effective efficiency coefficient is introduced, which is the ratio of engine useful output to its input non-renewable power.

**Key words:** heat engine, Stirling engine, solar energy, efficiency coefficient.

#### REFERENCES

1. *Renewable energy resources (Poland's experience for Ukraine)* / Ryszard Tytko, Volodymyr Kalinichenko; Warsaw; Krakow; Poltava: OWG, 2010. – 533 p. [in Ukrainian]
2. Elizarov A. Controlled thermonuclear fusion // *Transactions of Kremenchuk State Polytechnical University*. – Kremenchuk: KSPU. – 2/2003 (19), Vol 3. – 2003. [in Russian]
3. <http://www.iter.org/proj/iterandbeyond> (official site of ITER)
4. Cherepanov V. Stirling engines – energy conservation and ecologic problems. // *Transactions of*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. – Kremenchuk: KrNU, 2011. – Iss. 3/2011 (68), Part 1. [in Russian]

5. <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2008/solargrid.html>/ (official site of Sandia National Laboratories).

Стаття надійшла 02.11.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Ляшенко В.П.