

ШВИДКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ТА ЇХ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Войтенко В.А., к.т.н., доцент

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса,

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

Запропоновано методику математичного моделювання швидкісних характеристик двигуна внутрішнього згорання, що дозволяє врахувати залежність цих характеристик, як від швидкості обертання колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання, так і від коефіцієнта відкриття заслінки подачі палива. У пакеті Matlab перевірена працездатність запропонованої методики.

The method of mathematical design of speed descriptions of combustion engine is offered, allowing to take account dependence of these descriptions, both from speed crankshaft's rotation of combustion engine and from the coefficient of opening the fuel serve's shutter. The capacity of the offered method is tested in the Matlab Simulink package.

Ключові слова: зовнішні і часткові швидкісні характеристики, двигун внутрішнього згорання, інтерполяція.

При проведенні теоретичних досліджень тягово-швидкісних властивостей і паливної економічності автомобіля необхідно мати математичну модель двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) [1]. Ця модель повинна з достатньо великою достовірністю відображати швидкісні і паливні характеристики ДВЗ. В зв'язку з тим, що фізичні процеси, які відбуваються в ДВЗ дуже складні, то побудувати математичну модель на їх базі занадто складно. Тому пропонується в основу математичної моделі покласти швидкісні і паливні характеристики ДВЗ, одержані експериментально. Швидкісні характеристики ДВЗ визначають залежність механічної потужності і рушійного механічного моменту, що розвиває ДВЗ, від частоти обертання його валу при постійному значенні коефіцієнта відкриття дросельних заслінок. З [2, 3] відомо, що швидкісні характеристики ДВЗ ділять на зовнішні і часткові. Зовнішні характеристики експериментально визначають при повному відкритті дросельних заслінок або при повній подачі палива в циліндри ДВЗ, а часткові – при частковому відкритті дросельних заслінок або при неповній подачі палива в циліндри ДВЗ. На рис.1. і на рис.2 показано приблизний вигляд зовнішніх і часткових швидкісних характеристик. Графік 1 відповідає зовнішній швидкісній характеристиці ДВЗ, а графіки 2, ..., 6 – частковим швидкісним характеристикам ДВЗ.

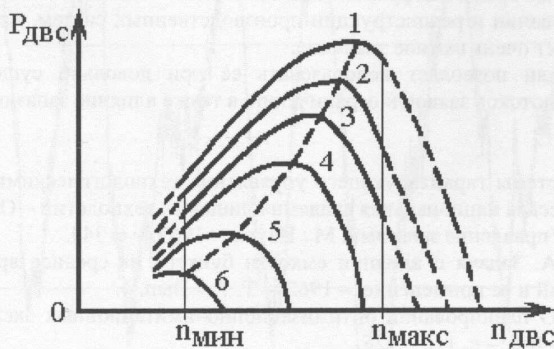


Рис. 1 – Приблизний вигляд зовнішньої і часткових швидкісних характеристик ДВЗ по потужності

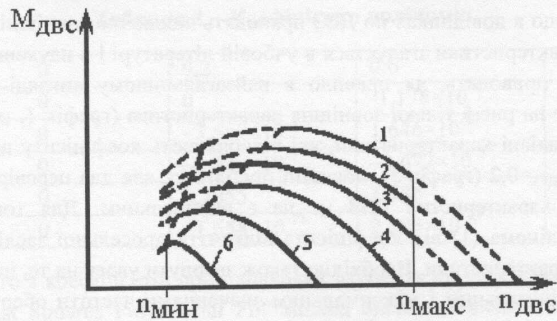


Рис. 2 – Приблизний вигляд зовнішньої і часткових швидкісних характеристик ДВЗ по моменту

Оскільки динаміка автомобіля в першу чергу залежить від моменту, що розвиває ДВЗ, то для моделювання роботи ДВЗ необхідно на підставі експериментальних швидкісних характеристик $M_{двз}=f(\rho_{двз})$, приведених на рис.2, одержати аналітичну залежність $M_{двз}=f(\omega_{двз})$. Оскільки характеристики $M_{двз}=f(\rho_{двз})$ мають нелінійну форму, то їх робочі ділянки можна апроксимувати поліномом n -го порядку наприклад, з використанням інтерполяційної формули Лагранжа [4], або з застосуванням обчислювальної техніки. Для спрощення математичної моделі ДВЗ при апроксимації швидкісних характеристик бажано використовувати поліном мінімального ступеня, але для зменшення похибки аналітичного опису швидкісних характеристик ДВЗ ступінь полінома доведеться підвищити. У загальному випадку швидкісні характеристики ДВЗ (рис.2) при різних значеннях коефіцієнта відкриття дросельної заслінки описуються поліномом n -го ступеня

$$\dot{I}_{\text{ААС}} = a_{M_i(n)} \omega_{\text{ААС}}^n + a_{M_i(n-1)} \omega_{\text{ААС}}^{n-1} + \dots + a_{M_i(2)} \omega_{\text{ААС}}^2 + a_{M_i(1)} \omega_{\text{ААС}} + a_{M_i(0)}, \quad (1)$$

де $a_{M_i(n)}$, $a_{M_i(n-1)}$, ..., $a_{M_i(2)}$, $a_{M_i(1)}$, $a_{M_i(0)}$ – коефіцієнти полінома n -го ступеня, що описує i -у швидкісну характеристику $M_{двз_i}=f(\omega_{двз})$, яка відповідає певному значенню коефіцієнта відкриття дросельної заслінки ДВЗ.

Оскільки кожна швидкісна характеристика $M_{двз_i}=f(\omega_{двз})$ відповідає певному значенню коефіцієнта відкриття дросельної заслінки і описується поліномом з певними значеннями коефіцієнтів $a_{M_i(n)}$, $a_{M_i(n-1)}$, ..., $a_{M_i(2)}$, $a_{M_i(1)}$, $a_{M_i(0)}$, то можна побудувати графіки залежності $a_{M_i(n)}(\varphi_{др})$, $a_{M_i(n-1)}(\varphi_{др})$, ..., $a_{M_i(2)}(\varphi_{др})$, $a_{M_i(1)}(\varphi_{др})$, $a_{M_i(0)}(\varphi_{др})$ і описати їх поліномами 1-го, 2-го або більш великих ступенів. В результаті одержимо математичну модель ДВЗ, блок-схема якої наведена на рис.3. Ця схема повинна працювати таким чином. Водій оцінює швидкість руху автомобіля або частоту обертання валу ДВЗ за допомогою відповідних пристроїв і, при необхідності, за допомогою педалі змінює значення коефіцієнта відкриття дросельної заслінки ДВЗ $\varphi_{др}$. На підставі нового значення $\varphi_{др}$ спочатку проводиться розрахунок нових значень коефіцієнтів $a_{M_i(n)}$, $a_{M_i(n-1)}$, ..., $a_{M_i(2)}$, $a_{M_i(1)}$, $a_{M_i(0)}$. В результаті (навіть при незмінному значенні швидкості обертання валу ДВЗ) робоча точка переходить на іншу часткову швидкісну характеристику. Це супроводжується зміною значення моменту, який розвиває ДВЗ, і приводить до зміни значення кутової швидкості його валу. Значення потужності, що розвиває ДВЗ, визначається добутком моменту на кутову швидкість його валу. Тому, якщо розробити методику моделювання швидкісних характеристик ДВЗ за моментом (рис.2), то немає потреби в моделюванні швидкісних характеристик ДВЗ за потужністю (рис.1).

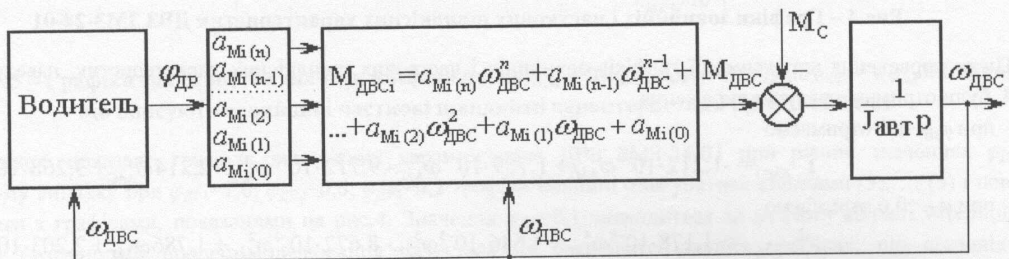


Рис.3 – Блок-схема математичної моделі ДВЗ

Для перевірки працездатності запропонованого способу моделювання швидкісних характеристик ДВЗ розглянемо графіки зовнішньої і часткових швидкісних характеристик двигуна ЗМЗ-24-01, показаних на рис.4.

Тут необхідно відзначити, що в довідниках по ДВЗ приводять виключно зовнішні швидкісні характеристики, а про часткові швидкісні характеристики згадується в учбовій літературі і в наукових статтях. Причому часткові швидкісні характеристики приводять, як правило в найзагальнішому вигляді без нанесення шкал на осі координат (рис. 1, 2). Тому на рис.5 тільки зовнішня характеристика (графік 1, $\varphi_{др1}=1,0$) відповідає ДВЗ типа ЗМЗ-24-01, а часткові швидкісні характеристики, які відповідають коефіцієнту відкриття дросельної заслінки ДВЗ $\varphi_{др2}=0,6$ (графік 2) і $\varphi_{др3}=0,2$ (графік 3), показані приблизно, але для перевірки запропонованої методики моделювання швидкісних характеристик ДВЗ це не є вирішальним. Для того щоб отримати нелінійну залежність коефіцієнтів полінома (1) від коефіцієнта відкриття дросельної заслінки ДВЗ необхідно мати як мінімум три швидкісних характеристики. Необхідно також звернути увагу на те, що робоча ділянка швидкісних характеристик обмежена мінімальним і максимальним значеннями частоти обертання вала ДВЗ. Мінімальне значення ($n_{\text{мін}}$) відповідає мінімальному значенню швидкості на якій може стабільно працювати ДВЗ, а максимальне значення швидкості ($n_{\text{макс}}$) обмежено динамічними навантаженнями, які мають місце в ДВЗ, а також обмеженням швидкості процесів згоряння палива в ДВЗ.

Для аналітичного опису графіків будемо використовувати блок "Least Squares Polynomial Fit", що входить до складу пакету "Signal Processing Blockset" системи програмування MATLAB. Оскільки при нульовій швидкості обертання вала ДВЗ паливо в двигун не буде поступати, то він буде розвивати нульовий обертаючий момент. Таким чином усі швидкісні характеристики мають проходити через початок системи координат. Попередні обчислення показали, що при достатній достовірності апроксимації швидкісних характеристик ця умова буде виконуватись, якщо графіки зовнішньої і часткових швидкісних характеристик (рис.4) будуть описуватись поліномами не нижче 3-го або 4-го ступеня. В загальному випадку різні швидкісні характеристики можуть описуватись поліномами різних ступенів.

Поліном 4-го ступеня можна представити в загальній формі

$$\dot{i}_{\text{ААЦ}} = a_{\text{Мі}(4)} \omega_{\text{ААЦ}}^4 + a_{\text{Мі}(3)} \omega_{\text{ААЦ}}^3 + a_{\text{Мі}(2)} \omega_{\text{ААЦ}}^2 + a_{\text{Мі}(1)} \omega_{\text{ААЦ}} + a_{\text{Мі}(0)}, \quad (2)$$

де і – номер графіка зовнішньої або часткової швидкісної характеристики.

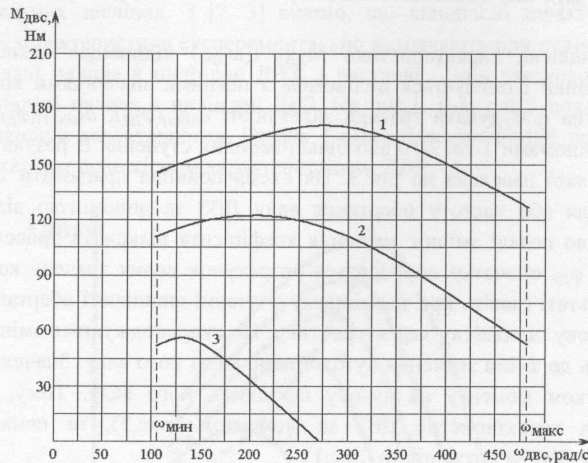


Рис.4 – Графіки зовнішніх і часткових швидкісних характеристик ДВЗ ЗМЗ-24-01

Після проведення апроксимації графіків зовнішніх і часткових швидкісних характеристик, наведених на рис.4, були отримані наступні вираження:

– при $\varphi_{др}=1,0$ отримаємо

$$\dot{i}_{\text{ААЦ}1} = -1,212 \cdot 10^{-8} \omega_{\text{ААЦ}}^4 + 1,759 \cdot 10^{-5} \omega_{\text{ААЦ}}^3 - 9,712 \cdot 10^{-3} \omega_{\text{ААЦ}}^2 + 2,214 \omega_{\text{ААЦ}} + 3,268 \cdot 10^{-13}, \quad (3)$$

– при $\varphi_{др}=0,6$ отримаємо

$$\dot{i}_{\text{ААЦ}2} = -1,178 \cdot 10^{-8} \omega_{\text{ААЦ}}^4 + 1,646 \cdot 10^{-5} \omega_{\text{ААЦ}}^3 - 8,672 \cdot 10^{-3} \omega_{\text{ААЦ}}^2 + 1,786 \omega_{\text{ААЦ}} + 2,203 \cdot 10^{-13}, \quad (4)$$

– при $\varphi_{др}=0,2$ отримаємо

$$\dot{i}_{\text{ААЦ}3} = 0 \omega_{\text{ААЦ}}^4 - 3,569 \cdot 10^{-6} \omega_{\text{ААЦ}}^3 - 1,649 \cdot 10^{-3} \omega_{\text{ААЦ}}^2 + 0,7055 \omega_{\text{ААЦ}} - 1,688 \cdot 10^{-14}. \quad (5)$$

Таким чином, в залежності від значення $\varphi_{др}$ коефіцієнти поліномів (3),..., (5) при 4-му, 3-му, 2-му, 1-му і 0-му ступенях $\omega_{\text{ДВЗ}}$ мають значення, які наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Коефіцієнти поліномів

$\varphi_{ДР}$	0	0,2	0,6	1,0
$a_{Mi(4)}, Нмс^4$	0	0	$-1,178 \times 10^{-8}$	$-1,212 \times 10^{-8}$
$a_{Mi(3)}, Нмс^3$	0	$-3,569 \times 10^{-6}$	$1,646 \times 10^{-5}$	$1,759 \times 10^{-5}$
$a_{Mi(2)}, Нмс^2$	0	$-1,649 \times 10^{-3}$	$-8,672 \times 10^{-3}$	$-9,712 \times 10^{-3}$
$a_{Mi(1)}, Нмс$	0	0,7055	1,786	2,214
$a_{Mi(0)}, Нм$	0	$-1,688 \times 10^{-14}$	$2,203 \times 10^{-13}$	$3,268 \times 10^{-13}$

Оскільки значення кожного з коефіцієнтів при однакових ступенях $\omega_{ДВЗ}$ відповідає певному значенню $\varphi_{ДР}$, то за допомогою блоку “Least Squares Polynomial Fit” можна одержати аналітичні залежності значень цих коефіцієнтів від $\varphi_{ДР}$. При цьому треба прийняти до уваги, що при $\varphi_{ДР} = 0$ паливо в ДВЗ поступати не буде і двигун не буде розвивати обертаючий момент. Тому при $\varphi_{ДР} = 0$ всі коефіцієнти поліномів (3),..., (5) мають дорівнювати нулю, як це показано в таблиці 1. З врахуванням цього були одержані аналітичні залежності значень цих коефіцієнтів від $\varphi_{ДР}$

$$\dot{a}_{i(4)} = 8,483 \cdot 10^{-8} \varphi_{AP}^3 - 1,17 \cdot 10^{-7} \varphi_{AP}^2 + 2,0 \cdot 10^{-8} \varphi_{AP} - 0, \quad (6)$$

$$\dot{a}_{i(3)} = -0,1723 \cdot 10^{-3} \varphi_{AP}^3 + 0,251 \cdot 10^{-3} \varphi_{AP}^2 - 6,115 \cdot 10^{-5} \varphi_{AP} + 1,355 \cdot 10^{-20}, \quad (7)$$

$$\dot{a}_{i(2)} = 34,22 \cdot 10^{-3} \varphi_{AP}^3 - 42,9 \cdot 10^{-3} \varphi_{AP}^2 - 1,035 \cdot 10^{-3} \varphi_{AP} - 1,735 \cdot 10^{-18}, \quad (8)$$

$$\dot{a}_{i(1)} = -0,662 \varphi_{AP}^3 - 0,8475 \varphi_{AP}^2 + 3,723 \varphi_{AP} + 4,163 \cdot 10^{-16}, \quad (9)$$

$$\dot{a}_{i(0)} = -1,537 \cdot 10^{-12} \varphi_{AP}^3 + 2,359 \cdot 10^{-12} \varphi_{AP}^2 - 4,947 \cdot 10^{-13} \varphi_{AP} + 2,019 \cdot 10^{-28}. \quad (10)$$

На підставі (6), ..., (10) на рис.5 побудовано графіки $a_{Mi(2)} = f(\varphi_{ДР})$, $a_{Mi(1)} = f(\varphi_{ДР})$, $a_{Mi(0)} = f(\varphi_{ДР})$.

Таким чином, задаючи значення коефіцієнта відкриття дросельної заслінки ДВЗ по виразах (6),..., (10) визначаємо значення коефіцієнтів полінома (2). При незмінному значенні $\varphi_{ДР}$ значення коефіцієнтів полінома (2) будуть постійними, а момент, що розвиває ДВЗ, буде залежати тільки від швидкості обертання його колінчастого валу.

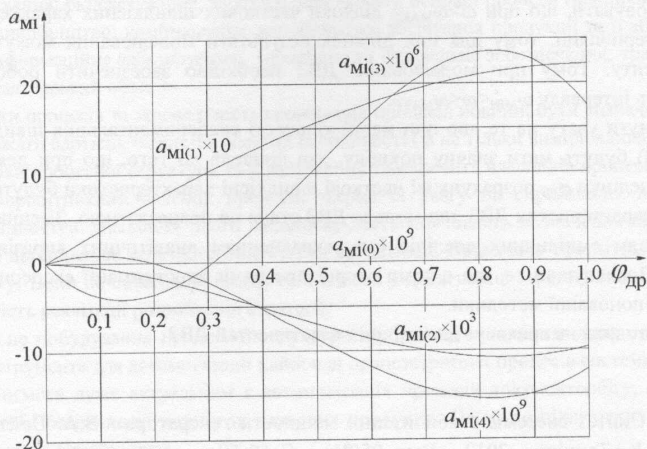


Рис.5 – Графіки залежностей значень коефіцієнтів $a_{Mi(2)} = f(\varphi_{ДР})$, $a_{Mi(1)} = f(\varphi_{ДР})$, $a_{Mi(0)} = f(\varphi_{ДР})$ поліномів, що описують зовнішні і часткові швидкісні характеристики ДВЗ ЗМЗ-24-01

На рис.6 показано графіки швидкісних характеристик ДВЗ ЗМЗ-24-01 при різних значеннях $\varphi_{ДР}$. У ідеальному випадку при $\varphi_{ДР1}=1,0$; $\varphi_{ДР2}=0,6$; $\varphi_{ДР3}=0,2$ графіки повинні описуватися виразами (3),..., (5) і повинні співпадати з графіками, показаними на рис.4. Значення $\varphi_{ДР}=0,1$ знаходиться за межами області інтерполяції, оскільки розглянутий процес моделювання базується на експериментальних графіках, що відповідають $0,2 \leq \varphi_{ДР} \leq 1,0$. Тому розрахункова швидкісна характеристика, що відповідає значенню коефіцієнта відкриття дросельної заслінки $\varphi_{ДР}=0,1$ може істотно відрізнятись від експериментальної характеристики. Крім того, необхідно врахувати, що при $0,2 \leq \varphi_{ДР} \leq 1,0$ ділянки швидкісних характеристик, що відповідають $\omega_{ДВЗ} < \omega_{\text{мин}}$ і $\omega_{ДВЗ} > \omega_{\text{макс}}$ також знаходяться за межами області інтерполяції.

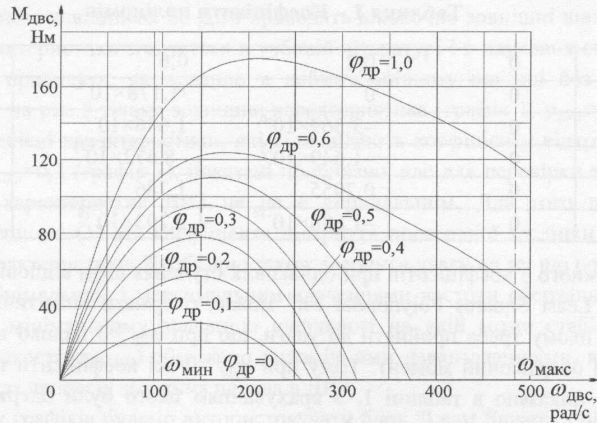


Рис. 6 – Зовнішня і часткові швидкісні характеристики ДВЗ, одержані в результаті моделювання

На підставі виконаного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Запропонована методика моделювання заснована на експериментальних швидкісних характеристиках ДВЗ. Вона не базується на описі складних фізичних процесів, що протікають в ДВЗ, а лише враховує їх вплив на характеристики ДВЗ. У цьому її простота, переваги і недоліки.

2. Оскільки при $\omega < \omega_{\text{мін}}$ ДВЗ працювати не може, то немає потреби описувати швидкісні характеристики ДВЗ на цьому інтервалі, тобто немає потреби виконувати умову про необхідність проходження всіх швидкісних характеристик через початок системи координат. Можна прийняти, що при $\omega < \omega_{\text{мін}}$ ДВЗ розвиває нульовий обертаючий момент незалежно від значення коефіцієнта відкриття дросельної заслінки $\phi_{\text{др}}$. Це дозволить більш точно описати швидкісні характеристики при $\omega > \omega_{\text{мін}}$ за допомогою поліномів меншого ступеня. Але при цьому для вивода ДВЗ в робочий режим необхідно застосовувати стартер, за допомогою якого ДВЗ буде розганятись до швидкості $\omega > \omega_{\text{мін}}$. Це необхідно враховувати при моделюванні ДВЗ.

3. Необхідно враховувати, що при $\omega > \omega_{\text{макс}}$ ділянки часткових швидкісних характеристик ДВЗ знаходяться за межами області їх інтерполяції, тому для цих ділянок результати моделювання можуть суттєво відрізнятись від результатів експерименту. Тому при моделюванні ДВЗ необхідно забезпечити роботу моделі при значеннях швидкості, які належать інтервалу $\omega_{\text{мін}} < \omega < \omega_{\text{макс}}$.

4. Необхідно звернути увагу на те, що при малій кількості експериментальних швидкісних характеристик ДВЗ залежності (6), ..., (10) будуть мати значну похибку, яка приведе до того, що при деяких значеннях коефіцієнта відкриття дросельної заслінки $\phi_{\text{др}}$ розрахункові часткові швидкісні характеристики будуть настільки відрізнятись від реальних швидкісних характеристик ДВЗ, що модель ДВЗ стане не працездатною. Зменшення похибки моделювання пов'язано зі збільшенням емпіричних дослідів і з ускладненням аналітичних виразів, що описують швидкісні характеристики ДВЗ. Враховуючи те, що є комп'ютерні програми апроксимації експериментальних даних, це не є великим недоліком запропонованої методики.

5. Пропонована методика не враховує динамічних властивостей ДВЗ.

Література

1. Войтенко В.А. Синтез системы стабилизации мощности генератора / В.А. Войтенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи – К.: Техніка. – 2012. – Вып. 05(81). – С. 62-69.
2. Абрамчук Ф. І. Автомобільні двигуни: Підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко – К.: Арістей, 2006. – 476 с.
3. Автомобильный справочник фирмы Bosh/ пер. с англ. Г.С. Дугин, Е.И. Комаров, Ю.Ф. Онуфрийчук; – [2-е изд.]. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулём»», 2004. – 992 с.
4. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления: учебник для вузов / Н. С. Пискунов – М.: Физматгиз, 1963. – 856 с.