

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОЗДОВЖНЬОГО ЗГИНАННЯ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

**Кондель В.М.**

*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри виробничо-інформаційних технологій та безпеки життєдіяльності*

**Шевченко Ю.О.**

*студентка групи ПН-515 психолого-педагогічного факультету*

**Лобода Д.О.**

*студент групи ІІІ-32 історичного факультету*

*Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г.Короленка  
м. Полтава*

Щоденно засоби масової інформації повідомляють про надзвичайні події, внаслідок яких відбувається порушення нормальних умов життя і діяльності людей і які можуть призвести або призводять до загибелі людей та значних матеріальних втрат. Найчастіше вони виникають через аварії та катастрофи, основною причиною яких є людський фактор, внаслідок чого щодня гинуть сотні людей через недбалість та прорахунки фахівців. Іноді аварії та катастрофи відбуваються через руйнування конструкцій, елементів машин та споруд, які при певних умовах досягли свого граничного стану, що не було враховано при їх розрахунках і проектуванні, як це сталося 21 листопада 2013 року у Ризі, де в мікрорайоні Золітуде зруйнувалися стіни і дах торговельного центру «Махіма», внаслідок чого загинули десятки людей, в тому числі, троє рятувальників (рис. 1).



*Рис. 1. Зруйновані стіни і дах торговельного центру «Махіма» у Ризі*

Відомо, що гарантією надійності конструкцій, елементів машин та споруд є задоволення умов їх міцності, жорсткості та стійкості. Особливу увагу слід

звернути на явище втрати стійкості, яке є дуже небезпечним і може призвести до трагічних наслідків, оскільки в цьому випадку відбувається некерований ріст деформацій і конструкція руйнується практично миттєво, що виключає будь-яку можливість вжиття дієвих заходів щодо запобігання аваріям та катастрофам [1, 2]. Втрата стійкості може відбутися в елементах конструкцій та деталей машин, які працюють на стискання: колони, стійки, верхні пояси ферм, штоки парових машин та поршневі насосів, гвинти в передачах гвинт-гайка, циліндричні та конічні гвинтові пружини, різальні інструменти для обробки отворів (свердла, зенкери, розвертки, мітчики) на свердлильних верстатах, голки у швейних машинах та інші [2-4]. Саме тому одним з найважливіших напрямків попередження надзвичайних ситуацій є дослідження допустимих напружень і навантажень на стиснуті елементи конструкцій та ретельне виконання всіх організаційних заходів щодо недопущення подібних аварій та катастроф в майбутньому.

Вагомий внесок для вирішення проблеми стійкості стиснутих елементів конструкцій та деталей машин внесли видатні вчені XVIII-XX століть Л. Ейлер, Ф. Енгессер, Ф. Ясинський, Л. Тетмайєр, Т. Карман, Ф. Шенлі та інші [1-4], які запропонували умову стійкості з коефіцієнтом поздовжнього згинання  $\varphi$  :

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq [\sigma]_{st} = \varphi[\sigma], \quad (1)$$

де  $\sigma$  та  $[\sigma]$  – робоче та основне допустиме напруження;  $[\sigma]_{st}$  – допустиме або безпечне напруження на стійкість,  $F$  – робоча поздовжня сила;  $A$  – площа поперечного перерізу стиснутого стержня.

Формула (1) дуже часто використовується на практиці при розрахунках елементів на стійкість, зокрема, для визначення допустимих напружень і навантажень, тому дослідження коефіцієнтів зменшення основного допустимого напруження або коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  для стиснутих елементів конструкцій та деталей машин є актуальним.

Досліди показали, що коефіцієнт  $\varphi$  залежить від гнучкості елемента  $\lambda$ , тобто  $\varphi = f(\lambda)$ . В свою чергу,

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт зведення довжини стержня, який залежить від способу закріплення його кінців (рис. 2);  $l$  – довжина стержня;  $i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$  – мінімальний радіус інерції;  $I_{\min}$  – мінімальний момент інерції [2].

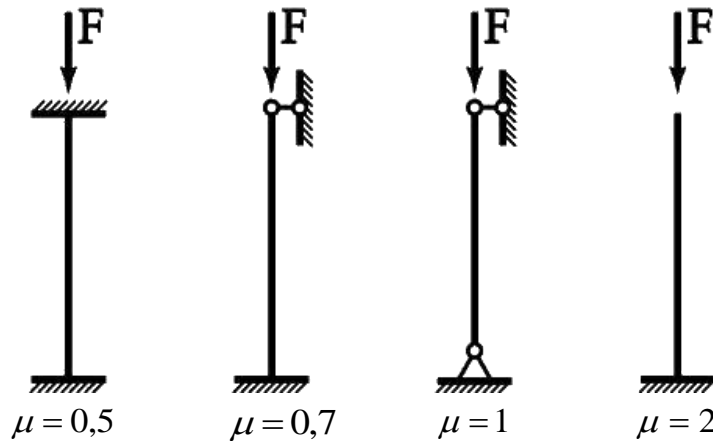


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів  $\mu$  від способу закріплення кінців стержня

Останні дослідження [2, 5] показали, що гнучкість стиснутих елементів  $\lambda$  залежить не тільки від вищезгаданих чинників, але й від жорсткості опор, що було враховано авторами при розрахунках коефіцієнта зведення довжини стержня  $\mu$  [5]. Слід також зазначити, що формула (2) для розрахунків гнучкості була використана при проектуванні раціональних складених перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин [6].

За результатами експериментальних даних вчені багатьох країн світу одержали значення коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  для стійок, виготовлених з різних матеріалів: сталей різної міцності та марки, чавуну, алюмінієвих сплавів, деревини (сосна, ялина), кам'яних та армокам'яних елементів, бетонних та залізобетонних конструкцій, представленими у вигляді таблиць [2-4]. В свій час вчені запропонували залежності  $\varphi = f(\lambda)$  для деревини і сталі [2, 7-9], які складаються з двох або трьох різних рівнянь [2, 7, 8], або стосується лише сталі марки Ст 3 [9], тому для практичних розрахунків стиснутих елементів слід вивести одне рівняння, враховуючи властивості матеріалів, з яких виготовлені ці елементи. Оскільки переважна більшість

стиснутих елементів конструкцій та деталей машин виготовляється із сталі різної міцності, виведемо формулу для визначення коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  саме для сталевих зразків.

Для оцінки точності розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  використаємо табличні дані експериментів [2-4] для зразків, виготовлених з різних матеріалів, зокрема, для сталей різної міцності, і побудуємо відповідні графіки залежностей  $\varphi = f(\lambda)$  (рис. 3-5).

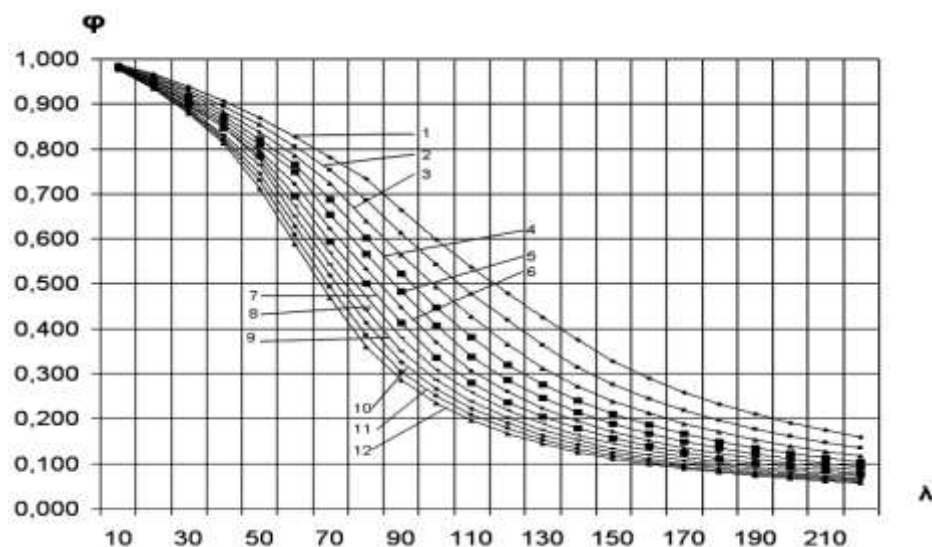


Рис. 3. Залежності  $\varphi = f(\lambda)$  для стиснутих елементів з різним розрахунковим опором сталі: 1 – 200 МПа; 2 – 240 МПа; 3 – 280 МПа; 4 – 320 МПа; 5 – 360 МПа; 6 – 400 МПа; 7 – 440 МПа; 8 – 480 МПа; 9 – 520 МПа; 10 – 560 МПа; 11 – 600 МПа; 12 – 640 МПа

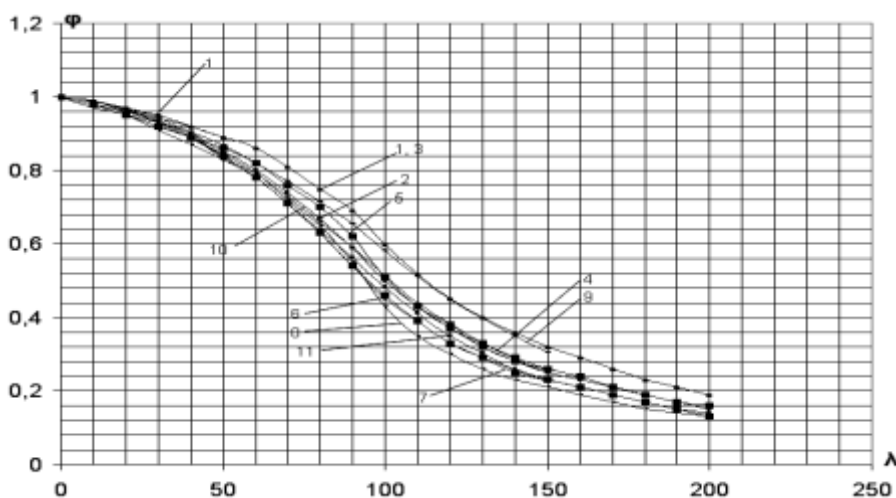


Рис. 4. Залежності  $\varphi = f(\lambda)$  для стиснутих елементів, виготовлених з різних марок сталі: 1 – Ст 2, Ст 3, Ст 4; 2 – Ст 5; 3 – Сталь 20, 30, 40; 4 – Сталь 50; 5 – НЛ-1; 6 – НЛ-2; 7 – 14 Г2, 15 ГС, 10Г2С, 15ХСНД; 8 – СПК; 9 – С-38/23; 10 – С-44/29; 11 – С-46/33

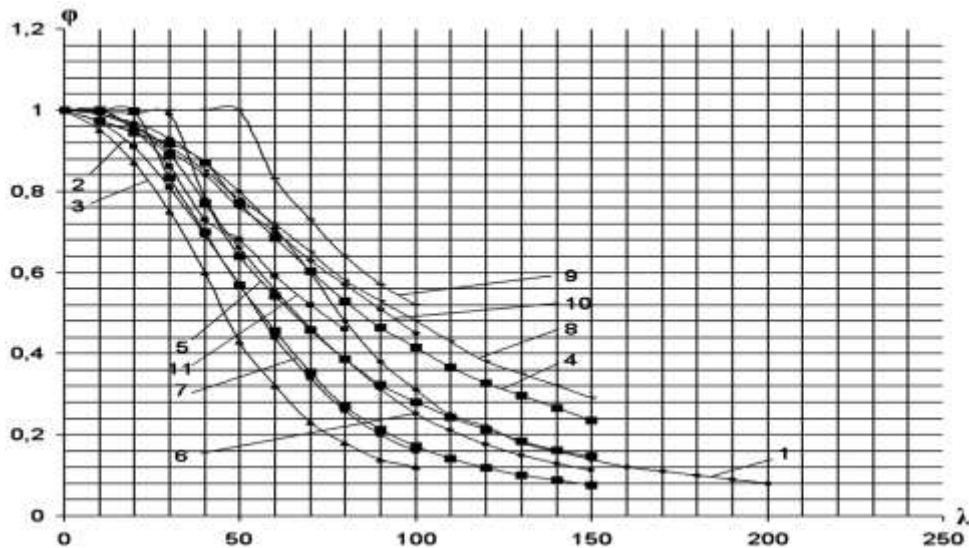


Рис. 5. Залежності  $\varphi = f(\lambda)$  для стиснутих елементів, виготовлених з різних матеріалів: 1 – дерева (сосна, ялина); 2 – чавуни СЧ 12-28, СЧ 15-18, СЧ 15-30, СЧ 15-32, СЧ 15-36, СЧ 18-36, СЧ 21-40; 3 – чавуни СЧ 21-44, СЧ 24-44, СЧ 28-48; алюмінієві сплави: 4 – АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5; 5 – АМг6; 6 – АВТ1; 7 – ДІ6Т; 8 – кам'яні та армокам'яні елементи; 9 – залізобетон; бетон: 10 – важкий; 11 – легкий

Для аналізу залежності коефіцієнта  $\varphi$  від міцності сталі за дослідними даними [3, 4] будемо ще графік функції  $\varphi = f(R_y)$ , де  $R_y$  – розрахунковий опір сталі (рис. 6). Очевидно, що коефіцієнт поздовжнього згинання  $\varphi$  залежить не тільки від гнучкості стержня  $\lambda$ , але й від міцності матеріалу, з якого він виготовлений. Зокрема, для сталі з підвищенням її міцності (рис. 6) та зростанням гнучкості (рис. 3) коефіцієнт  $\varphi$  зменшується, тому для практичних розрахунків виведемо формулу для визначення коефіцієнта поздовжнього згинання з урахуванням його залежності від цих чинників.

Нами були проведені дослідження точності розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  відповідно за формулами [7] і [8] з порівнянням експериментальних  $\varphi^{\text{exp}}$  і теоретичних  $\varphi^{\text{th}}$  значень цих коефіцієнтів і визначенням середніх арифметичних  $\delta_m$  і середніх квадратичних  $\sigma_m$  похибок. Рівняння [8] більш зручні для розрахунків коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$ , ніж громіздкі формули [7], але останні дозволяють значно точніше визначити коефіцієнти  $\varphi$  (похибки складають  $\delta_m = 1,91\%$  і  $\sigma_m = 2,20\%$ ), в той

час як за формулами [8] – відповідно  $\delta_m = 8,26\%$  і  $\sigma_m = 10,32\%$ . Це означає, що необхідно скласти одне рівняння, яке б враховувало властивості як низькоміцних, так і високоміцних сталей і мало б прийнятні для практичних розрахунків показники точності (до 5%).

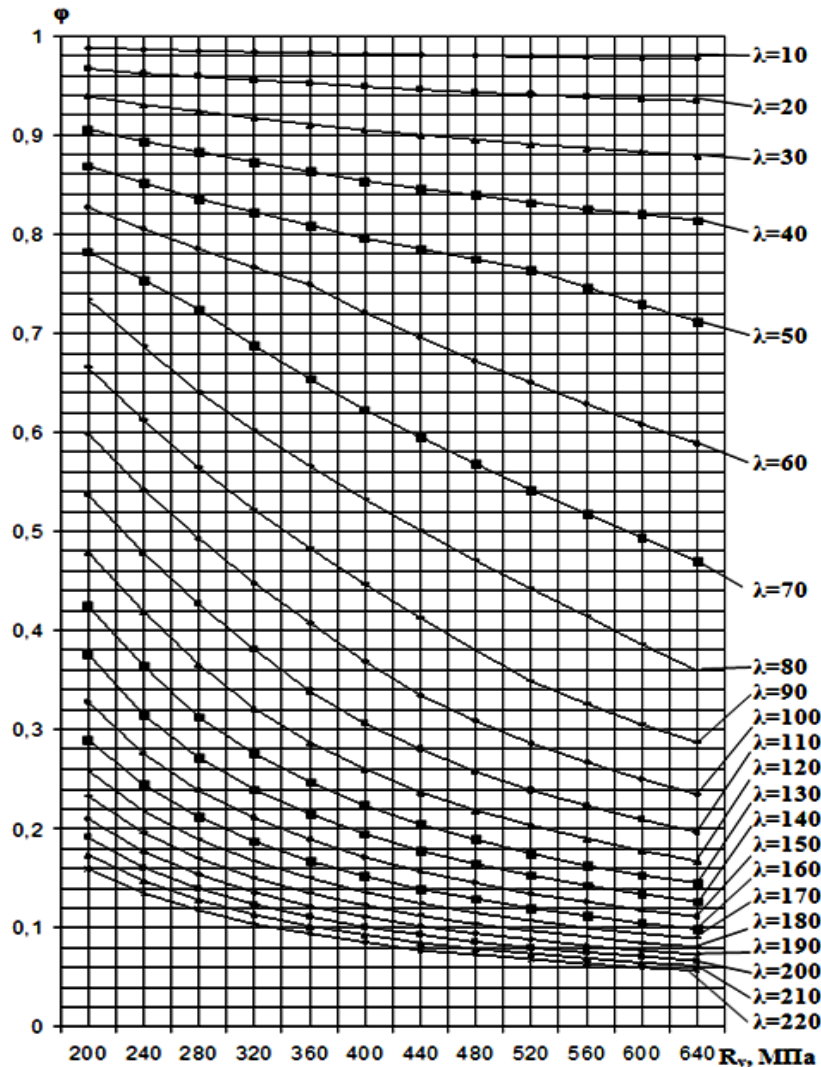


Рис. 6. Залежності  $\varphi = f(R_y)$  для стиснутих сталевих елементів з різними гнучкостями  $\lambda$

Аналіз діаграм (рис. 3) для сталевих стиснутих стійок показав, що графіки функції  $\varphi = f(\lambda)$  подібні до кривої  $x^2 y = 4a^2 (2a - y)$ , яка називається локоном Аньєзі [10]. Для цієї кривої при  $x = 0$   $y = 2a$ . В свою чергу, при  $\lambda = 0$   $\varphi = 1$ . Замінивши  $x$  на  $\lambda$ , а  $y$  на  $\varphi$ , визначаємо  $a = 0,5$  і отримуємо рівняння  $y = 1/(x^2 + 1)$ . Враховуючи різну кривизну графіків  $\varphi = f(\lambda)$  для низькоміцних і високоміцних сталей (рис. 3), маємо залежність

$$\varphi = \frac{1}{(a\lambda^2 + b\lambda + c)^2 + 1}, \quad (3)$$

де  $a, b$  і  $c$  – коефіцієнти, які залежать від розрахункового опору сталі  $R_y$ :

$$(a, b, c) = k_0 + k_1 R_y + k_2 R_y^2, \quad (4)$$

де  $k_0, k_1$  і  $k_2$  – параметри, які враховують міцність сталі і визначаються за допомогою методу найменших квадратів;  $R_y$  – розрахунковий опір сталі в МПа. Значення параметрів  $k_0, k_1$  і  $k_2$  та їх розмірності наведено в наступній таблиці.

*Значення параметрів  $k_0, k_1$  і  $k_2$*

Коефіцієнти	Параметри		
	$k_0$	$k_1, \text{МПа}^{-1}$	$k_2, \text{МПа}^{-2}$
$a$	0,00236	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$-3,27 \cdot 10^{-8}$
$b$	-0,00238	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$-1,43 \cdot 10^{-8}$
$c$	0,217	$-9,83 \cdot 10^{-4}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$

Для оцінки точності складеного нами рівняння (3) були проведені додаткові розрахунки теоретичних значень коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi^{th}$  для сталених стійок у діапазонах гнучкостей стиснутих елементів від 10 до 220 і розрахункових опорів сталі від 200 до 640 МПа. Порівняння теоретичних значень  $\varphi^{th}$  з експериментальними даними  $\varphi^{exp}$  [2-4] свідчать про достатню для практичних розрахунків точність запропонованої нами формули (3): середні значення відхилень складають  $\delta_m = 3,69\%$  і  $\sigma_m = 4,51\%$ .

Таким чином, для попередження надзвичайних ситуацій, які можуть виникнути при експлуатації стиснутих елементів конструкцій та деталей машин, проведено дослідження коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$  для стійок, виготовлених з різних матеріалів, з побудовою відповідних графіків.

Встановлено, що коефіцієнт  $\varphi$ , який використовується для визначення допустимих або безпечних напружень і навантажень на стиснуті елементи, залежить не тільки від гнучкості стержня  $\lambda$ , але й від міцності матеріалу, з якого він виготовлений. Зокрема, для сталі з підвищенням її міцності та зростанням гнучкості коефіцієнт  $\varphi$  зменшується, на що слід звернути увагу при

проектуванні стійок з високоміцних сталей.

Запропонована нами формула (3) враховує гнучкість стержня  $\lambda$  і міцність сталі, з якої він виготовлений, має достатню для практичних розрахунків точність, тому рекомендується для визначення коефіцієнтів поздовжнього згинання  $\varphi$ .

Аналогічні дослідження слід провести для стиснутих елементів, виготовлених з інших матеріалів: чавуну, алюмінієвих сплавів, деревини, каменю, бетону, залізобетону тощо. Ці розробки дозволять підвищити надійність та довговічність елементів конструкцій та деталей машин і запобігти багатьом аваріям і катастрофам в майбутньому.

## Література

1. Барданов Ю. М. Курс сопротивления материалов в структурно-логических схемах / Ю. М. Барданов. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1988. – 215 с.
2. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
3. Лихтарников Я. М. Расчет стальных конструкций: справочное пособие [2-е изд., перераб. и доп.] / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков – Киев: Будівельник, 1984. – 368 с.
4. Васильченко В. Т. Справочник конструктора металлических конструкций / В. Т. Васильченко, А. Н. Рутман, Е. П. Лукьяненко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К. : Будівельник, 1990. – 312 с.
5. Кондель В. Дослідження стійкості сталених стиснених елементів конструкцій з урахуванням умов їх закріплення та жорсткості опор / В. Кондель, А. Павліченко // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2011. – Т. 16. – № 4. – С. 18 – 27.
6. Кондель В. М. Дослідження раціональних перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин / В. М. Кондель, М. М. Шевчук, Р. Т. Холодков // Технічні науки : Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – № 2 (65). – С. 29 – 35.
7. Справочник по расчету строительных конструкций на программируемых микрокалькуляторах / А. Я. Барашиков, М. Г. Гольдберг, Ю. Н. Кушнарєв и др.; под ред. А. Я. Барашикова и В. А. Пермякова. – Киев: Будівельник, 1989. – 224 с.
8. Кондель В. М. Дослідження стійкості сталених стиснутих елементів сталого та змінного поперечних перерізів / В. М. Кондель, А. І. Павліченко // Фізико-математичні науки : Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : КНУ, 2011. – № 4. – С. 76 – 79.
9. Кондель В. М. Дослідження стійкості елементів конструкцій та деталей машин раціональних складених перерізів / В. М. Кондель, Р. Т. Холодков, М. М. Шевчук // Весник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета : сборник научных трудов. – Выпуск 68. – 2015. – С. 50 – 56.
10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под общей ред. И. Г. Арамановича. – 4-е изд. – Москва: Наука, 1978. – 832 с.