

С.У.Гончаренка. – Львів: Світ, 1999. – 302 с.

2. Крайг Г. Психология развития. – СПб.: Питер, 2000. – 992 с.

3. Райс Ф. Психология подросткового и юношеского возраста. – СПб.: Питер, 2000. – 624 с.

4. Гончаренко С.У. Український педагогічний словник. – К.: Либідь, 1997. – 378 с.

5. Монахова Г.А. Образование как рабочее поле интеграции // Педагогика. – 1997. – № 5. – С. 52-55.

6. Реан А.А., Коломинский Я.Л. Социальная педагогическая психология. – СПб.: Питер Ком, 1999. – 416 с.

*Орищин Ю.М.*

*Український державний лісотехнічний університет*

## **ВИЯВЛЕННЯ КОРПУСКУЛЯРНИХ ТА ХВИЛЬОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОНІВ**

В останні роки все гостріше постає проблема осмисленого реформування, проектування і впровадження нових моделей викладання фізики. Це обумовлено змінами в суспільстві, технології та фізиці, як науці, котрі визначають створення адекватних соціально педагогічних умов. В цьому аспекті актуальною залишається завдання відбору для розробок такого навчального матеріалу, щоб зміст навчання був у першу чергу націлений на охоплення основних базових світоглядних положень фізики. Це дозволить будувати навчання таким чином, щоб на початку у студентів формувался фундамент і каркас фізичних знань. Студент повинен, не відволікаючись на дрібниці, зрозуміти та засвоїти основні поняття, їх місце та роль у системі фізичних знань.

В контексті наведеного вище особливе місце належить, не простому як для викладання, так і для свідомого засвоєння студентами, розділів загальної фізики, пов'язаних з квантовою механікою. Їх технологія навчання ще недостатньо сприяє формуванню у студентів квантово-механічних понять, що веде до неусвідомлення ними принципів та положень атомної фізики.

Один із шляхів удосконалення технології навчання полягає у впровадженні в лабораторному практикумі курсу загальної фізики досліджень, пов'язаних з квантовою механікою, в котрих:

- пояснення результатів досліджень вимагало б застосування її важливих понять і принципів;
- використовувались сучасні технічні засоби вимірювання (автоматизації та візуалізації експерименту).

Одна з таких робіт розроблена та реалізована нами у відповідній технології навчання. Вона побудована на порівнянні результатів дослідження руху електронів у поздовжньому електричному полі ( $0 - 10 \text{ В}$ ), з однієї сторони, у вакуумі або водні, з іншої, у суміші аргону з криптоном.

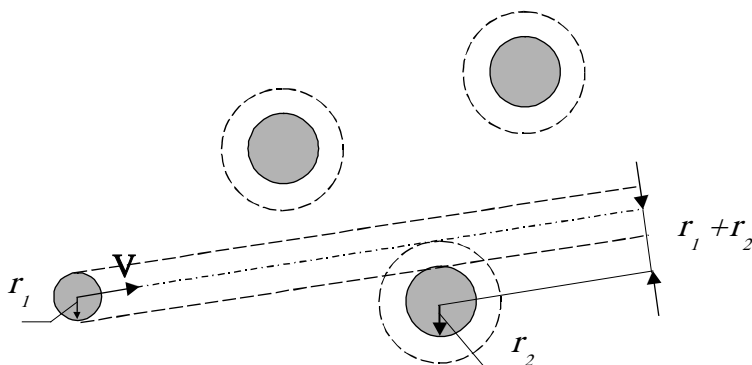
Важливо, що особливості вольт-амперних характеристик, отриманих у аргоні і криптоні, не можна пояснити, виходячи з класичних міркувань. Це можна зробити аналогічно так, як це запропонував зробити Н. Бор для пояснення ефекту Рамзауера [1, 2], врахувавши хвильові властивості електронів та представляючи атоми аргону і криптону у вигляді прямокутної потенціальної ями [3]. Ефект Рамзауера протягом довгого часу мав статус наукової проблеми. Щоб зрозуміти це явище, необхідно розглянути спосіб просвітлення оптики, що був запропонований українським фізиком О. Смакулою [4-5]. Залучення студентів до історії та логіки розв'язку цієї проблеми буде "школою" виховання мислення студентів. Тим паче, що наслідки цього ефекту можна легко відобразити в простому навчальному експерименті.

*Взаємодія електронів з нейтральними атомами. Ефект Рамзауера*

Зіткнувшись з вільним електроном, нейтральний атом може:

- а) пружно розсіяти електрон, змінивши напрям його швидкості і дещо змінити свою енергію;
- б) перейти у збуджений стан, тобто піднятися на більш високий рівень енергії;
- в) втратити електрон і стати іоном.

Виходячи з суто геометричних уявлень (рис.1), зіткнення відбудеться, коли центри молекули та електрона наблизяться на відстань, меншу за  $r = r_1 + r_2$ , яку називають ефективним радіусом, а  $\pi r^2$  – ефективним перерізом зіткнення  $\sigma$ .



**Рис. 1.** Електрон зіткнеться з молекулою газу, якщо її центр знаходиться на відстані  $r_1 + r_2$  від центру електрона

**Таблиця**

**Радіуси та маси молекул деяких газів та електрона**

	радіус, м	маса, кг
водень	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$0,332 \cdot 10^{-26}$
криптон	$1,98 \cdot 10^{-10}$	$13,8 \cdot 10^{-26}$
аргон	$1,92 \cdot 10^{-10}$	$6,64 \cdot 10^{-26}$
електрон	$2,82 \cdot 10^{-15}$	$9,1 \cdot 10^{-31}$

Зауважимо, що в загальному випадку при вивченні процесів розсіяння заряджених частинок іонами і нейтральними атомами, під ефективним перерізом розуміють величину, що служить мірою їх взаємодії і дозволяє замінити складну картину реального процесу зіткнень простою моделлю стрільби частинками по маленьких круглих мішенях, розкиданих у просторі.

Врахувавши дані таблиці, величина  $\sigma$  для електронів, розсіяних на молекулах  $Ar$  і  $Kr$ , не повинна бути меншою від

$$\sigma = \pi r^2 = 3,14(1,92) \sim 10^{-19} \text{ м.}$$

В 1921 р. Рамзауер, досліджуючи вільний пробіг електронів в різних газах, отримав дещо незвичні результати. На рис.2 приведено залежність ефективного перерізу пружного розсіяння  $\sigma$  електронів від їх енергії  $W$ : (а) в  $H_2$  і  $He$ ; (б) в  $Kr$  і  $Ar$ .

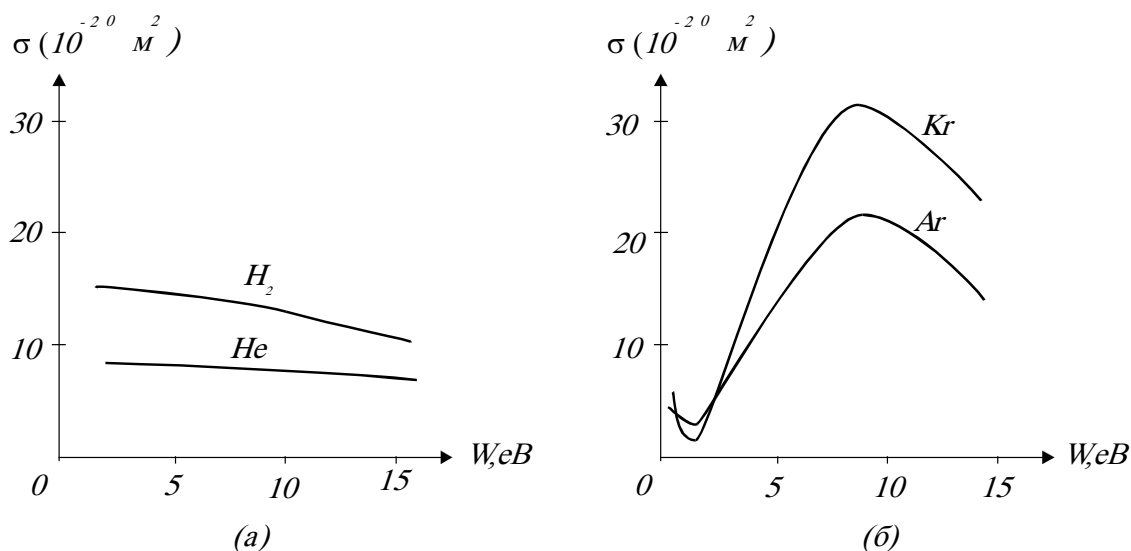


Рис.2. Залежність ефективного перерізу розсіяння  $\sigma$  від енергії електронів  $W$ : (а) в  $H_2$  і  $He$ ; (б) в  $Kr$  і  $Ar$

Для електронів з енергією більшою  $10 \text{ eV}$ , на всіх приведених кривих спостерігається зменшення ефективного перерізу розсіяння  $\sigma$  із збільшенням енергії електронів. Це зменшення величини  $\sigma$ , при збільшенні величини енергії електронів, спричинено зменшенням часу взаємодії електрона з атомом. При зіткненні з атомом швидкі електрони менше часу, порівняно із повільнішими, знаходяться коло атома газу і тому кулонівські сили менш ефективно відхилятимуть електрони.

Характерним для процесів розсіяння електронів атомами інертних газів є те, що криві в області малих енергій проходять через різко виражені мінімуми. Ці мінімуми вказують на те, що у вузькому інтервалі енергій (коло  $1 \text{ eV}$ ), дуже сильно послаблюється взаємодія електронів з атомами. Ефективний переріз розсіювання для них складає наближено  $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ , тоді ж як поперечний переріз атомів  $Kr$  і  $Ar$  є в 10 раз більший.

Отже, електрони з енергією коло  $1 \text{ eV}$  проходять через атоми криптону і аргону, майже не відбиваючись. Розсіяння електрона атомом залежить від енергії електрона (див. рис.3). Якщо його енергія не дорівнює енергії  $1 \text{ eV}$ , а є дещо більшою або меншою за неї, то він розсіється (рис.3,а), а коли його енергія є в межах  $1 \text{ eV}$ , то він „проходить” через атом (рис.3,б).

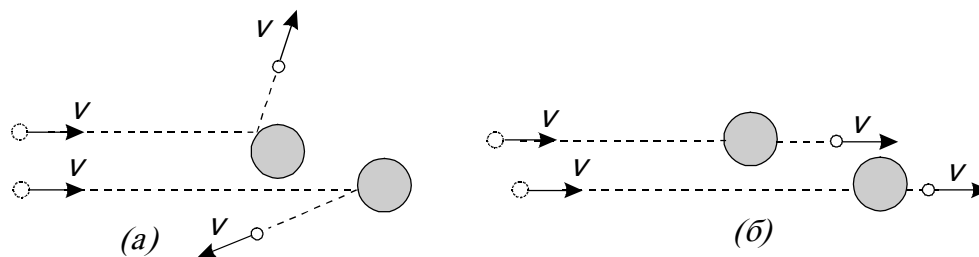


Рис.3. (а) Розсіяння електрона атомом; (б) Проходження електрона через атом

Виявилось, що пояснити появу цієї прозорості для пучка електронів з енергією коло 1 еВ в рамках класичної механіки частинок неможливо. Як ми вже зауважили, загальний розв’язок був запропонований Н.Бором.

*Експериментальна установка та аналіз результатів*

Основним елементом установки є вакуумна лампа 6Н7С та наповнена сумішшю аргону і криптону лампа ТГ-01-1,3 (тиратрон).

На рис. 4 схематично показано вигляд передньої панелі блоку установки.

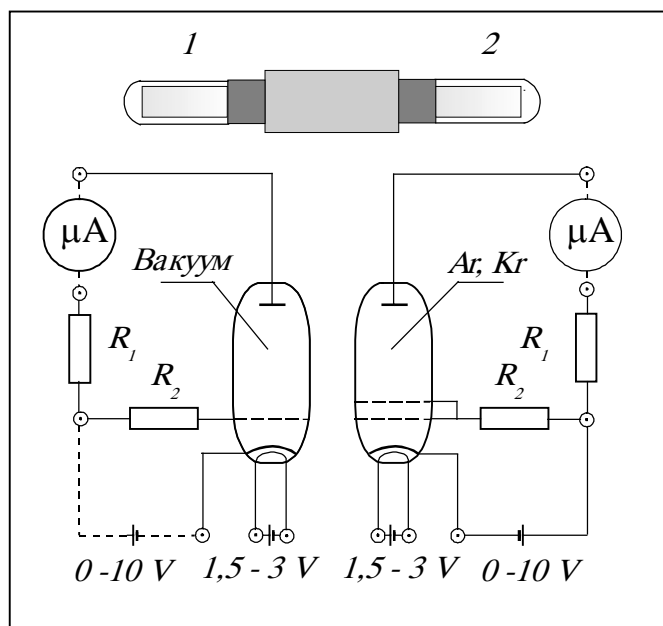


Рис. 4. Передня панель установки (1 – вакуумна електронна лампа, 2 – лампа, наповнена сумішшю аргону з криптоном,  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ )

Джерелом електронів у обох лампах є катод непрямого розжарення. Дослідження проводять, задаючи напругу нитки розжарення катоду ламп в межах 1,5 – 3 В та змінюючи прискорюючу напругу від 0 до 10 В.

Напруга на сітку ламп подається через опір  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ , що забезпечує обмеження сіткового струму та зменшує різницю потенціалів між сіткою та анодом. Електрони, випромінені нагрітим катодом, прискорюються постійним електричним полем, між катодом та сіткою ламп. Опір  $R_1 = 10 \text{ кОм}$  в анодному колі приводить до зменшення потенціалу відносно сітки: між сіткою та анодом електрони рухаються в невеликому затримаючому полі. Це дозволяє, по зміні величини анодного струму, зауважити можливі втрати енергії електроном під час зіткнень з атомами аргону та криптону.

Розроблено два режими використання установки: ручний та автоматичний.

У ручному режимі напругу на електроди ламп подають від блоку живлення ВІП-10. Криву залежності анодного струму від напруги знімають по точках, поступово збільшуючи потенціометром прискорюючу напругу і вимірюючи мікроамперметром Ф195 струм в анодному колі У автоматичному режимі комп'ютер забезпечує живлення, регулювання та візуалізацію експерименту. Для спряження установки з комп'ютером розроблено уніфікований інтерфейс на базі мікроконтролерів фірми Microchip.

На рис. 5 представлено типові результати досліджень залежності струму  $I$  в лампах від величини анодної напруги  $U$  ( $U = 2 \text{ В}$ ).

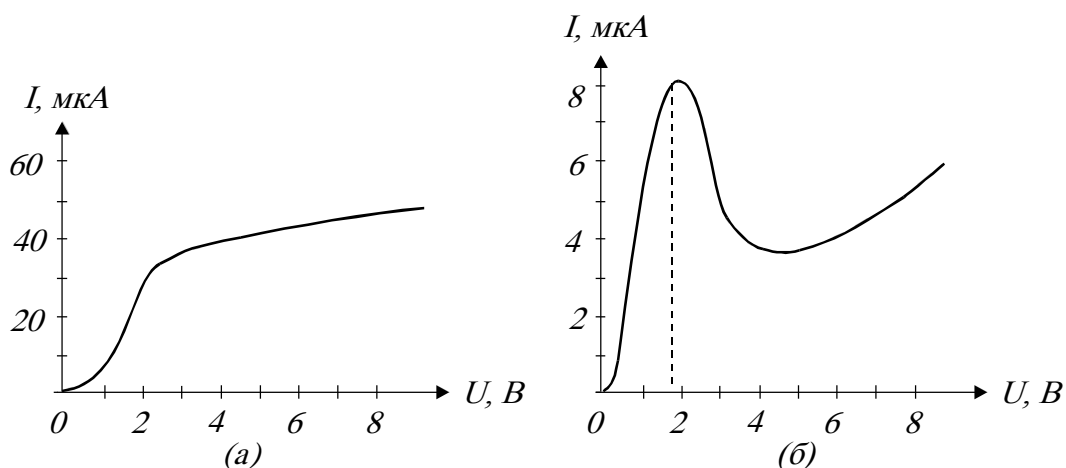


Рис. 5. Залежність струму  $I$  від анодної напруги  $U$ : (а) вакуумної лампи; (б) лампи, наповненої сумішшю аргону з криптоном

Крива рис.5,а описує добре відому в літературі залежність термоелектронного струму від напруги. Крива на рис.5,б дещо незвична, з огляду на чітко виражений максимум в області  $1,8 \text{ В}$ . Зрозуміло, що на її хід впливають зіткнення електронів з атомами  $\text{Ar}$  і  $\text{Kr}$ .

Зауважимо, що якщо врахувати контактну різницю потенціалів між електродами лампи, то максимум кривої відповідатиме напрузі 1 В. Його не можна пов'язати, як із непружними зіткненнями (збудженням та іонізацією газу), бо енергія рухомого електрона (до 10 еВ) недостатня для цього, так і з пружними зіткненнями, бо під час них електрони майже не втрачають енергію, через те що їх маса в тисячі разів менша за масу атомів газу.

Очевидно, що максимум на кривій (рис.5,б), можна пов'язати з цією надзвичайною прозорістю Ag і Kг, яку спостерігали в [1,2], яка отримала назву ефект Рамзауера.

*Пройходження світла через тонку плівку та електронної хвилі  
через потенціальну яму*

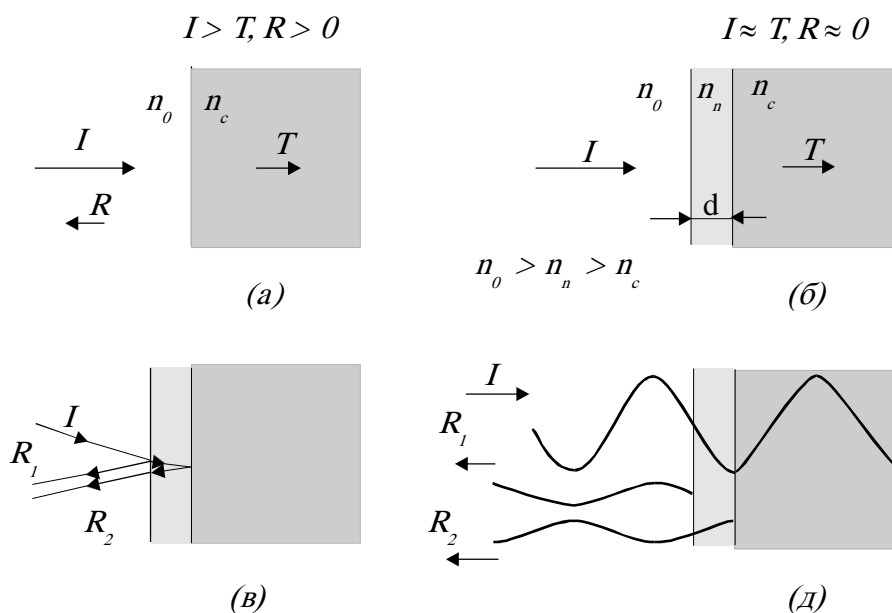
Розв'язок, запропонований Н.Бором, полягав в тому, що в процесах взаємодії з атомами електрони поведуться як хвилі і стають можливими явища, аналогічні тим інтерференційним ефектам, які можна спостерігати при проходженні світлових хвиль через тонкі шари речовини, зокрема підвищення прозорості оптичних об'єктів [4, 5].

Причина відсутності відбивання світла в тонких плівках полягає в наступному.

Щоб хвилі  $R_1$  і  $R_2$  послаблювали одна одну, різниця ходу променів має дорівнювати половині довжині хвилі у плівці:

$$2d = \frac{\lambda}{2n_n}.$$

Аналогічно, з аспекту хвильових властивостей, можна розглядати взаємодію електрона атомом. Співвідношення де-Бройля описує вільний електрон як електронну хвилю. Рівняння Шредінгера описує цю хвилю в силовому полі. Атоми Ag і Kг моделюємо одномірною потенціальною ямою – потенціальним бар'єром прямокутної форми з плоским дном, ширина якого відповідає розмірам атома, та стінками висотою  $U$  (рис. 6). Якщо стінки ями високі, від них відбуватиметься сильне відбивання хвиль де-Бройля, якими описуються налітаючі електрони. Відбиті при  $x = \pm x_0$  хвилі однакові по величині, але відрізняються на  $180^\circ$  по фазі.



**Рис.6.** (а)  $I$  – інтенсивність падаючого зліва світла на скло,  $R$  – відбите світло і  $T$  – світло, що пройшло через поверхню скла; (б) Невідбиваюче покриття; (в) Плівка створює різницю ходу променів; (д) Хвилі  $R_1$  і  $R_2$ , відбиті від передньої і задньої поверхні плівки, є в протифазі

Якщо час проходження хвилею від  $-x_0$  до  $+x_0$  і зворотньо до  $-x_0$  дорівнює одному періоду, тоді, складаючись алгебраїчно, відбита хвиля  $R_1$  і протилежна по фазі хвиля  $R_2$ , що відбита при  $-x_0$ , взаємно гаситимуться.

Щоб не було відбитої хвилі, довжина відповідної електрону хвилі  $\lambda$  повинна дорівнювати подвоєній ширині  $L$  ями:

$$\lambda = 2L = 8 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Згідно співвідношення де-Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

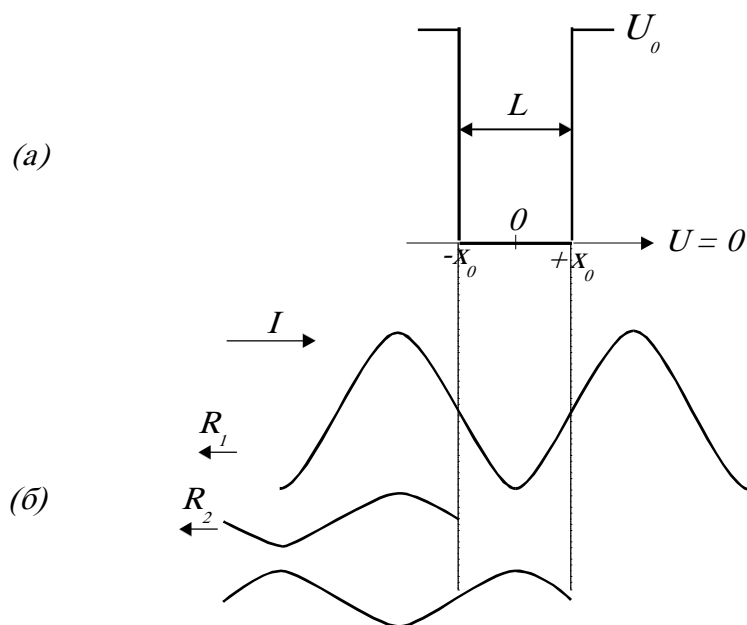
де  $p$  – імпульс частинки,  $h$  – постійна Планка, довжина електронної хвилі, що відповідає енергії  $1 \text{ eV}$  дорівнюватиме:

$$\lambda = 1,1 \times 10^{-9} \text{ м.}$$

Отримана довжина хвилі є співвимірною з подвоєною шириною потенціальної ями. Отже, створюються умови для безперешкодного проходження цієї хвилі (електрона) через атом.



На закінчення зауважимо, що впровадження приведеної вище розробки в навчальний процес полегшує засвоєння студентом вступу до квантової механіки і сприяє усвідомленню єдності фізичного знання та оволодінню сучасними технічними засобами вимірювання.



**Рис.7. Приклад відсутності відбивання електрона: (а) Електрон, що падає на прямокутну потенціальну яму; (б) Відбивання  $R_1$  і  $R_2$  при  $x = \pm x_0$  рівні по величині, але відрізняються по фазі на  $180^\circ$**

### Література

1. Спроул Р. Современная физика. Пер. с англ. – 2-е изд., перер. – М.: Наука, 1974. – С.160-162.
2. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. – 3 – е изд. – М.: Атомиздат, 1969. – С.71-74.
3. Месси Г., Бархот Е. Электронные и ионные столкновения / Пер. с англ. – М.: Иностран. литер., 1958. – С.9-32.
4. Smakula A. Verfahren zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit optischer Teile durch Erniedrigung des Brechungsexponenten an den Grenzflächen dieser optischen Teile. Patentschrift № 685767, Klasse 42 h, Gruppe 1<sub>01</sub>.
5. Біланюк О. Протівідбивний шар: дарунок Олександра Смакули людству // Фізичний збірник НТШ. – 1996. – Т.2. – С.21.