

Тема 23. Магнітне поле. Дія магнітного поля на заряди і струми.

Вектор магнітної індукції

При русі зарядів (зокрема при протіканні струму по провіднику) навколо них виникає **магнітне поле**. Його існування проявляється у дії сили на інші рухомі заряди (сила Лоренца) та на провідники зі струмом (сила Ампера). Щоб характеризувати силову дію магнітного поля, вводять **вектор індукції** (вектор \vec{B}).

Магнітна індукція – це силова характеристика магнітного поля. Вона визначає силу, яка діє на провідник зі струмом чи рухому частинку.

При протіканні струму по малому відрізку тонкого дроту напрямок вектору \vec{B} визначається за **правилом правого гвинта (буравчика)**: правий гвинт слід обертати так, щоб його переміщення співпадало з напрямком протікання струму, при цьому дотична до головки гвинта у кожній точці співпадатиме з напрямком вектору індукції (рис. 1).

На рис. 1а показаний напрямок вектору \vec{B} , створеного струмом J , що тече перпендикулярно до площини рисунка – «від нас»; на рис. 1б – «до нас».

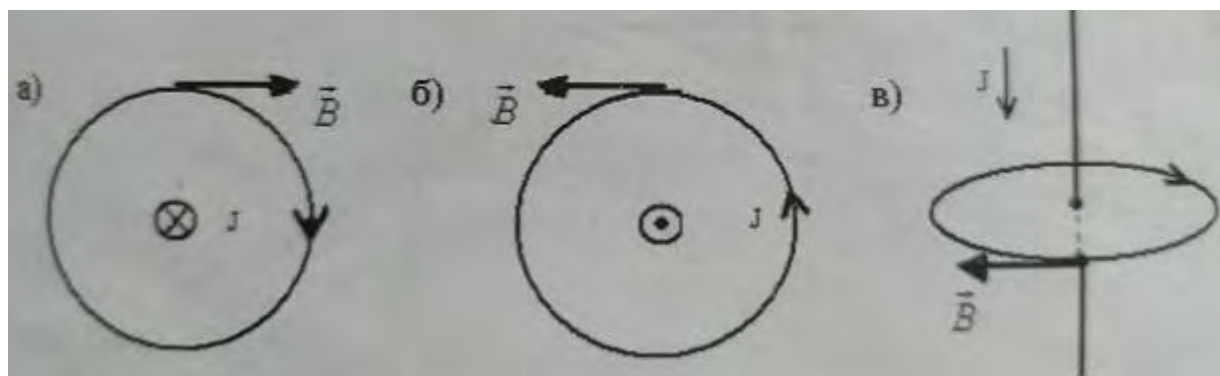


Рис. 1. Визначення напрямку вектору індукції.

Індукцію магнітного поля вимірюють у **теслах (Тл)**:
 $1 \text{ Тл} = 1 \text{ кг}/(\text{А} \cdot \text{с}^2)$.

Принцип суперпозиції магнітних полів: індукція магнітного поля в заданій точці простору, створеного декількома провідниками зі струмом, дорівнює сумі векторів індукції, створених кожних з провідників в цій точці:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n .$$

Сила Лоренца – це сила, яка діє на заряд q , що рухається зі швидкістю v у магнітному полі з індукцією \vec{B} з боку магнітного поля:

$$F_L = qvB\sin\alpha,$$

де α – кут між напрямками векторів \vec{v} та \vec{B} .

Напрямок сили Лоренца для позитивних зарядів визначають за **правилом лівої руки**: ліву руку слід розташувати так, щоб вектор \vec{B} входив у долоню, чотири пальці були витягнуті вздовж вектору \vec{v} , тоді відігнутий великий палець покаже напрямок сили Лоренца (рис. 2). Для **негативних зарядів** напрямок вектору **сили Лоренца** буде протилежний (рис. 2).

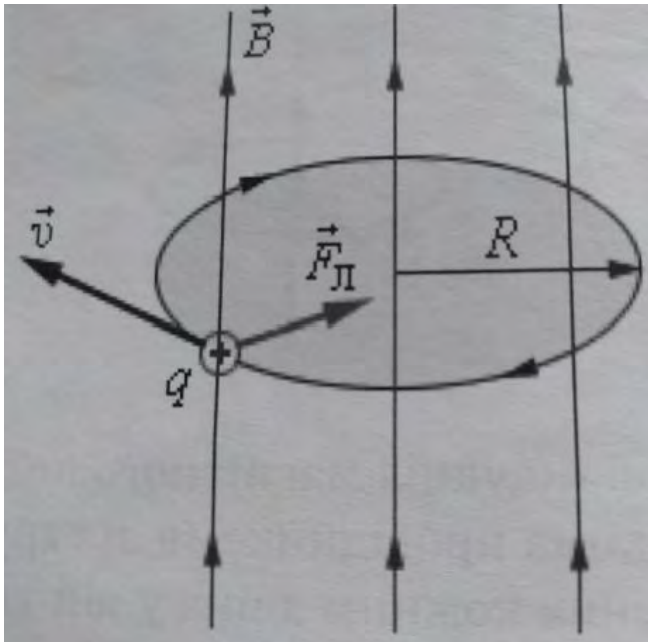


Рис. 2. Визначення напрямку сили Лоренца за правилом лівої руки.

З наведеного вище випливає, що сила Лоренца:

- 1) не діє на заряди, що рухаються вздовж (або протилежно) вектору \vec{B} (тоді $\alpha = 0$ або $\alpha = \pi$, відповідно $\sin\alpha = 0$);
- 2) не змінює величини швидкості, отже не виконує роботи, оскільки вона перпендикулярна до вектору переміщення заряду;
- 3) змушує рухатись заряди по дузі кола (або по колу), оскільки сила Лоренца є доцентровою силою.

В електричному полі з напруженістю \vec{E} на заряд q діє сила $\vec{F}_e = q\vec{E}$. На заряд q , що рухається зі швидкістю \vec{v} одночасно в магнітному полі з індукцією \vec{B} та електричному полі з напруженістю \vec{E} , діє сумарна сила, величина якої:

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_L - \text{формула Лоренца.}$$

Цю загальну силу інколи також називають силою Лоренца.

Сила Ампера діє на провідник зі струмом, який знаходиться у зовнішньому магнітному полі. У випадку, коли в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} знаходиться відрізок тонкого дроту довжиною l , по якому тече струм I , на нього діє сила:

$$F_A = BIl \sin \alpha ,$$

де α – кут між напрямком струму та вектором \vec{B} . В тонкому дроті струм тече вдовж осі провідника, отже α – це кут між віссю провідника та вектором \vec{B} .

Напрямок вектору \vec{F}_A визначається таким же чином, як і напрямок сили Лоренца – **за правилом лівої руки**: ліву руку слід розташувати так, щоб вектор \vec{B} входив у долоню, чотири пальці були витягнуті вздовж напрямку струму, тоді відігнутий великий палець покаже напрямок вектору сили Ампера (рис. 3). При цьому слід прийняти до уваги, що за напрямком струму приймається напрямок руху позитивних зарядів.

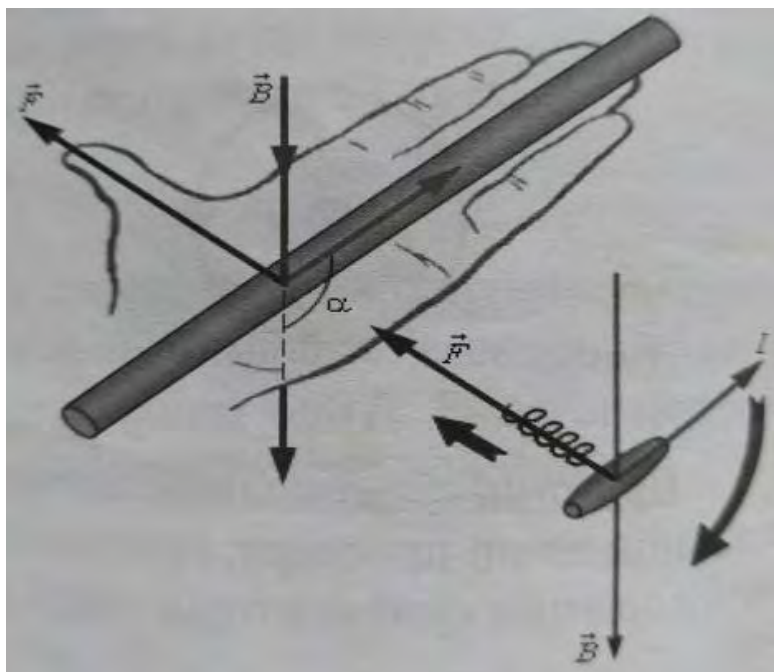


Рис. 3. Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки.

Якщо два тонкі дроти зі струмами I_1 та I_2 розташувати поруч, то кожний з них знаходиться у магнітному полі, створеному струмом в іншому дроті, і на кожен дріт діє сила Ампера з боку іншого дроту. Якщо струми I_1 та I_2 течуть **в одному напрямку**, то дроти **притягаються** один до одного, а якщо струми течуть **у протилежних напрямках**, то дроти **відштовхуються**. Сила взаємодії дротів, що припадає на одиницю їх довжини, дорівнює:

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi d} I_1 I_2 ,$$

де μ – магнітна проникність середовища (у вакуумі $\mu = 1$), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, d – відстань між дротами. Силу F в останньому виразі також називають силою Ампера.

Приклад 1. Яка сила діє на нерухомий протон у магнітному полі?

- А) сила Ампера;
- Б) сила Кулона;
- В) сила Лоренца;
- Г) сила всесвітнього тяжіння.

Відповідь: Г.

Приклад 2. Ім'я кого з науковців має дослід зі спостереження взаємодії магнітної стрілки та провідника зі струмом?

- А) Ампера;
- Б) Кулона;
- В) Ерстеда;
- Г) Торічеллі.

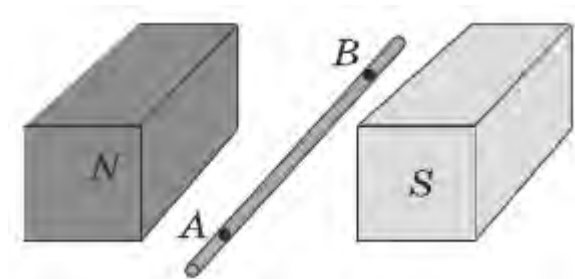
Відповідь: В.

Приклад 3. Під яким кутом до ліній індукції магнітного поля має рухатися електрон, щоб на нього не діяла сила Лоренца?

- А) 30° ;
- Б) 45° ;
- В) 90° ;
- Г) 180° .

Відповідь: Г.

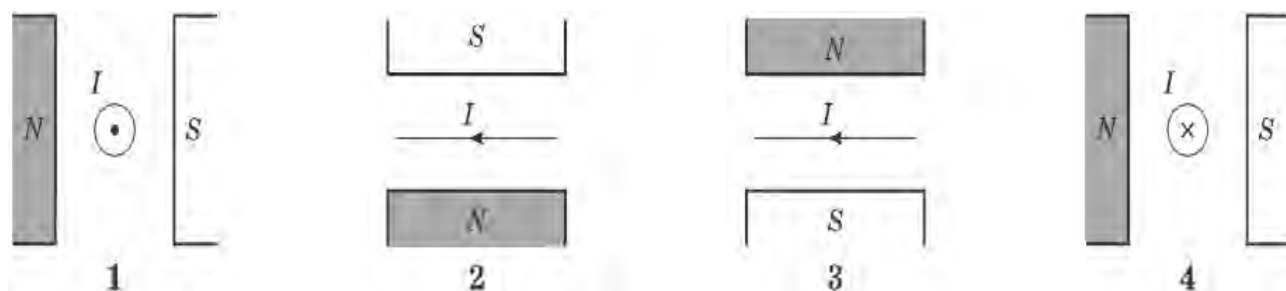
Приклад 4. Між полюсами магніту (див. рисунок) знаходиться прямий відрізок дроту, по якому у напрямку від точки А до точки В тече електричний струм. У якому напрямку магнітне поле магніту діє на провід?



- А) управо;
- Б) уліво;
- В) угору;
- Г) униз.

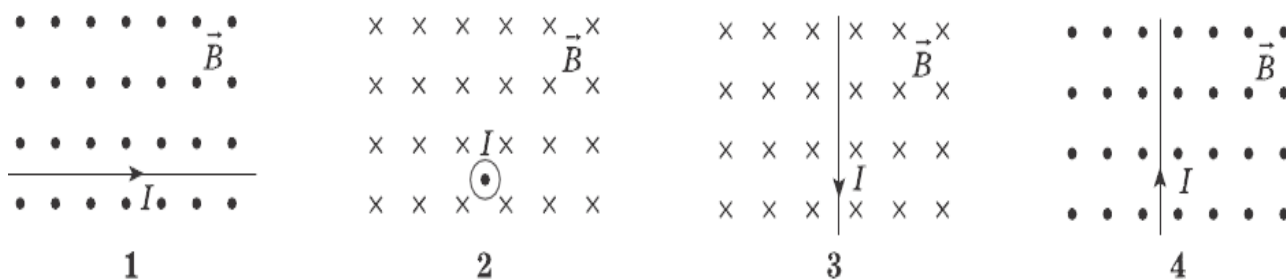
Відповідь: Г. Треба скористатись правилом лівої руки та врахувати, що лінії індукції виходять з північного полюса магніту (N) і входять у південний (S).

Приклад 5. Укажіть, в якому випадку сила Ампера діє вниз на провідник зі струмом, який знаходиться між полюсами магніту.



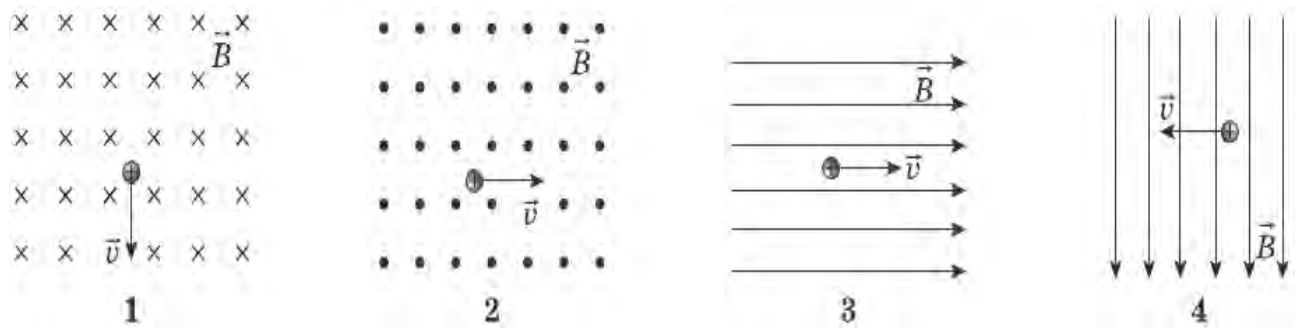
Відповідь: 4. Треба використати правило лівої руки. Також треба врахувати, що струм у провіднику тече від нас, якщо в перерізі провідника хрестик, і тече до нас, якщо в перерізі провідника точка.

Приклад 6. Укажіть, в якому випадку на провідник зі струмом магнітне поле не діє.



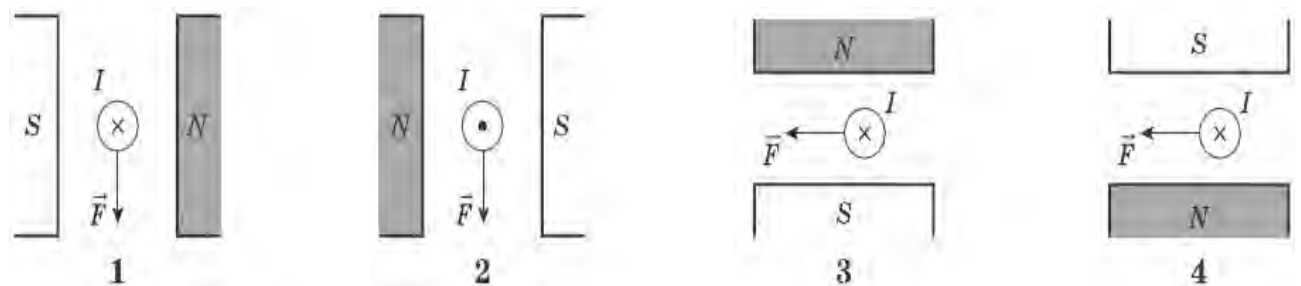
Відповідь: 2. На провідник зі струмом магнітне поле не діє у випадку, коли провідник паралельний до ліній індукції.

Приклад 7. Укажіть, у якому випадку на протон, що рухається в магнітному полі, це поле не діє.



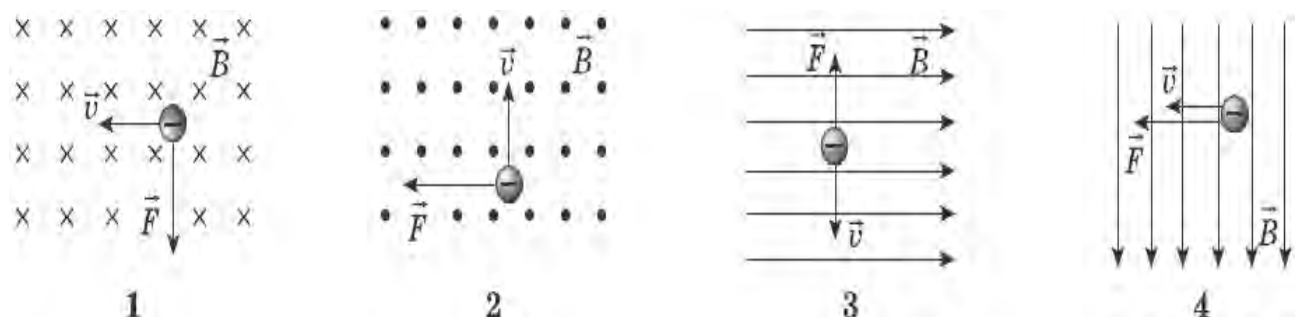
Відповідь: 3. Щоб магнітне поле не діяло на заряд, що рухається, цей заряд має рухатись уздовж (у напрямку чи протилежно) лінії індукції магнітного поля.

Приклад 8. Укажіть рисунок, на якому правильно вказаний напрямок сили Ампера, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі.



Відповідь: 3.

Приклад 9. Укажіть рисунок, на якому правильно вказаний напрямок сили Лоренца, що діє на електрон, який рухається у магнітному полі.



Відповідь: 2. Треба використати правило лівої руки. У випадку електрона чотири пальці лівої руки треба спрямувати протилежно до напрямку руху електрона, оскільки заряд електрона негативний.

Приклад 10. Яка сила діє на провідник довжиною 0,5 м, який знаходиться в магнітному полі з індукцією 0,1 Тл за сили струму в ньому 4 А? Поле й струм взаємно перпендикулярні.

$$F_A = BIl\sin\alpha = 0,1 \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,2 \text{ Н.}$$

Відповідь: 200 мН.

Приклад 11. Визначте індукцію магнітного поля, якщо в ньому на провідник довжиною 10 см, по якому проходить струм 50 А, діє сила 25 мН. Кут між векторами індукції та струму 30° .

$$F_A = BIl\sin\alpha, \quad B = \frac{F_A}{Il\sin\alpha} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 0,1 \cdot 0,5} = 0,01 \text{ Тл}$$

Відповідь: 10 мТл.

Приклад 12. Якою має бути довжина прямолінійного провідника, на який у магнітному полі з індукцією 250 мТл за сили струму в ньому 10 А діє сила 2 Н? Провідник повністю знаходиться у магнітному полі та перпендикулярний до ліній індукції.

$$F_A = BIl\sin\alpha, \quad l = \frac{F_A}{B I \sin\alpha} = \frac{2}{0,25 \cdot 10 \cdot 1} = 0,8 \text{ м.}$$

Відповідь: 0,8 м.

Приклад 13. Яка сила Лоренца діє на позитивний заряд 2 нКл, що рухається в магнітному полі з індукцією 200 мТл зі швидкістю 2 км/с? Напрямок руху заряду перпендикулярний до напрямку ліній індукції магнітного поля.

$$F_L = qvB\sin\alpha = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Відповідь: 0,8 мкН.

Приклад 14. З якою швидкістю рухається заряд 50 нКл у магнітному полі індукцією 0,1 Тл, якщо на нього діє сила 20 мкН? Заряд рухається під кутом 150° до напрямку ліній індукції магнітного поля.

$$F_L = qvB\sin\alpha, \quad v = \frac{F_L}{qB\sin\alpha} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot 0,5} = 8 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Відповідь: 8 км/с.

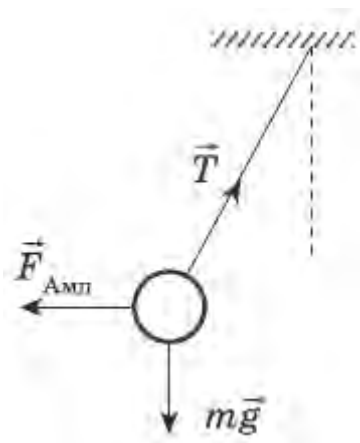
Приклад 15. Установіть відповідності між назвами сил та формулами, за якими їх можна обчислити.

| | |
|---|---------------|
| 1 | Сила Архімеда |
| 2 | Сила Кулона |
| 3 | Сила Лоренца |
| 4 | Сила Ампера |

| | |
|---|-----------------------------------|
| А | $F = qvB\sin\alpha$ |
| Б | $F = \rho gV$ |
| В | $F = IlB\sin\alpha$ |
| Г | $F = \mu N$ |
| Д | $F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ |

Відповідь: 1 – Б, 2 – Д, 3 – А, 4 – В.

Приклад 16. Горизонтальний провідник масою 20 г підвішено за кінці на двох дротах. Середня частина провідника довжиною 25 см знаходиться у вертикальному однорідному магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. У провіднику протікає струм 4 А. Визначте (у градусах) кут, на який відхиляються дроти від вертикалі. Вважайте, що $g = 10 \text{ м/с}^2$.



$$F_A = T \sin \alpha, \quad mg = T \cos \alpha, \quad \frac{F_A}{mg} = \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BIl}{mg} = \frac{0,2 \cdot 4 \cdot 0,25}{0,02 \cdot 10} = 1, \quad \alpha = 45^\circ.$$

Відповідь: 45° .

Приклад 17. Протон, який пройшов різницю потенціалів 10 кВ, влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 0,5 Тл перпендикулярно до ліній індукції. Визначте (у сантиметрах) радіус кола, по якому рухається протон.

Відповідь: 2,9 см.

Якщо протон влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній індукції, він починає рухатися по колу — сила Лоренца весь час буде перпендикулярною до напрямку швидкості руху протона з доцентровим прискоренням. Запишемо рівняння другого закону Ньютона для руху протона $F_{\text{л}} = ma \Rightarrow qvB = m \frac{v^2}{R}$. З урахуванням

того, що протон, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів, має швидкість $qU = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$, отримуємо значення радіуса траєкторії протона:

$$R = m \frac{v}{qB} = m \frac{\sqrt{\frac{2qU}{m}}}{qB} = \sqrt{\frac{2mU}{qB^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1 \cdot 10^4}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5^2}} \approx 0,029 \text{ (м)}.$$

Домашнє завдання:

основне: 3.126, 3.134, 3.135, 3.138, 3.139, 3.141

додаткове: 3.127, 3.128, 3.136, 3.140