**План**

1. Ферментативне перетворення вуглеводів у харчовому тракті людини
2. Поширення вуглеводів у організмі людини
3. Процеси перетворення вуглеводів на клітинному рівні:

3.1. Синтез глікогену з глюкози (глікогенез)

1. Розпад глікогену до глюкози (глікогеноліз)
2. Гліколіз (анаеробний розпад)
3. Дихання (аеробний розпад вуглеводів)
4. Енергетичні ефекти процесів

**Вуглеводи** складають біля 70 % харчового раціону людини (борошно, крупи, картопля – крохмалевмісні; мед, ягоди, фрукти – містять сахарозу, глюкозу і фруктозу), являючись основним джерелом енергії для організму. Поширений у природі полісахарид клітковина тільки частково засвоюється організмом людини за допомогою бактерій товстого кишечника. Основною функцією клітковини є забезпечення перистальтики харчового тракту, стимулювання секреторної діяльності, сприяння синтезу вітаміну К за допомогою кишечної мікрофлори.

Поскільки вуглеводи засвоюються у вигляді моноцукридів, то складні вуглеводи (дицукриди, поліцукриди) повинні попередньо розщепитися. Гідролітичне розщеплення проходить під впливом ферментів що носять загальну назву **глікозидази**. Оптимум дії глікозидаз лежить в нейтральному та слабколужному середовищі (виключення амілаза слини – слабкокисле), що і обумовлює певну локалізацію процесів розщеплення у харчовому тракті людини.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Відділ  травлення | Оптимум дії фер-ментних систем (рН) | Процеси | Ферменти |
| Ротова порожнина | 6.5–7.0 | Розщеплення крохмалю до декстринів, частково мальтози до глюкози і фруктози. | амілаза слини, мальтаза. |
| Стравохід | 7 | Процеси розщеплення відсутні у зв‘язку з швидким проходженням субстратів. |  |
| Шлунок | 1–2 | Процеси розщеплення відсутні у зв‘язку з інактивацією ферментів «кислим» середовищем. |  |
| 12–пала кишка | 7.0–7.5 | Остаточне розщеплення декстринів до дисахари-дів. | ферменти підшлункової залози: кінцева декстриназа, –амілаза, мальтаза, сахараза, лакта-за. |
| Тонкий кишечник | 7.0–7.5 | Розщеплення дисахаридів до моносахаридів. Посту-пання моносахаридів у кров. | Кінцева декстриназа, –амілаза, мальтаза, сахараза, лакта-за. |
| Товстий кишечник |  | Розщеплення клітковини до целобіози і глюкози. Синтез вітаміну К. Прохо-дять процеси збродження вуглеводневих залишків з виділенням СО2, Н2, СН4. Формування калових мас. | Целюлаза, ферментні системи бактерій. |

В тонкому кишечнику відбуваються процеси всмоктування моносахаридів через систему мембран у кров‘яне русло. Для процесу всмоктування характерно: знач-ні енергетичні витрати організму (активний фізіологічний процес); ізомеризація (трансформація, перетворення) суміші простих вуглеводів (98 %) у глюкозу; транспортування глюкози через мембрани у формі глюкозо-фосфату (навідь проти значень її концентрації у кров‘яному руслі).

З током крові моноцукриди через воротну вену потрапляють у печінку, де вико-ристовуються для біосинтезу глікогену (3–5 %), біосинтезу жирів (30–35 %), окислюються до вуглекислого газу і води (60–70 %). Певна, фізіологічно нормальна кількість глюкози (120 мг на 100 см3), є невід‘ємною складовою крові, забезпечуючи гомеостаз організму. Вона необхідна для нормального функціону-вання головного мозку, м‘язів серця, нервової тканини (глюкоза –головне джере-ло енергії).

При підвищеній концентрації глюкози в крові (більше 140 мг) говорять про **гіперглікемію.** Викликається вживанням продуктів багатих на вуглеводи (аліментарна гіперглікемія); недостатнім синтезом інсуліну (цукровий діабет); понад-нормовим синтезом адреналіну і глюкагону. Стан гіперглікемії приводить до ожиріння.

При пониженій концентрації глюкози в крові (менше 120 мг) говорять про **гіпоглікемію.** Викликається тривалим голодуванням; великими фізичними навантаженнями; недостатнім синтезом глюкагону і адреналіну; понаднормовим синтезом інсуліну. Приводить до деструктивних змін в головному мозку, нервовій тканині, нирках. Стан тривалої гіпоглікемії приводить до виснаження організму і смерті.

**Отже**:

Основна роль в процесах обміну вуглеводів належить печінці, діяльність якої регулюється нервовою і ендокринною системами (інсулін, адреналін–глюкагон).

У випадку повного енергетичного забезпечення організму, з надлишку глюкози синтезується глікоген. Процеси глікогенезу проходять в клітинах різних органів і тканин, але найбільшу здатність до накопичення мають клітини печінки. Глікоген печінки є основним резервним джерелом вуглеводів для організму.

**3. Процеси перетворення вуглеводів на клітинному рівні**

**3.1 Глікогенез (синтез глікогену з глюкози)**

1. Глюкоза, яка з током крові надходить у печінку активується за допомогою ферменту гексокінази і АТФ, перетворюючись в глюкозо-6-фосфат:

HO OH

CH2OH CH2O–P=O

H H H АТФ АДФ H H H

OH OH H OH OH OH H OH

H OH H OH

Глюкоза Глюкозо–6–фосфат

2. Глюкозо-6-фосфат під дією фосфоглюкомутази перетворюється на глюкозо-1-фосфат:

HO OH

CH2O–P=O CH2OH

H H H H H H

фосфоглюкомутаза OH

OH OH H OH OH OH H O–P=O

H OH H OH OH

Глюкозо–6–фосфат Глюкозо–1–фосфат

1. Глюкозо-1-фосфат повторно активується УТФ (уридинтрифосфатом) з вико-ристанням енергії двох макроергічних зв‘язків, утворюючи активовану ури-дин-дифосфатглюкозу.

УРИДИН

CH2OH CH2OH OH O

H H H H H H P

OH УТФ Н4Р2О7 O

OH OH H O–P=O OH OH H O–P=O

H OH OH H OH OH

Глюкозо–1–фосфат УДФ–глюкоза

4. Поскільки синтез глікогену проходить «затравочним» методом (у ролі затравки використовується залишок молекули глікогену), то активована УДФ-глюкоза приєднується до затравки за допомогою глікоген-синтетазних (утворює 1,4–зв‘язки) та трансглюкозилазних (утворює 1,6–зв‘язки) ферментних систем, збіль-шуючи молекулу глікогену на одну молекулу глюкози:

УРИДИН

CH2OH OH

H H H P О

O (С6H10O5)n УДФ

OH OH H O–P=O (C6H10O5)n+1

H OH OH

УДФ–глюкоза затравочний глікоген

**Висновок:**

синтез глікогену **енергоємний** процес (затрачається 2-і молекули АТФ); **автокаталітичний** (великі кількості вільного глюкозо-6-фосфату акти-вують глікогенсинтетазу–процеси глікогенезу посилюються; підвищені кількості УДФ інактивують глікогенсинтетазу–процеси глікогенезу припиняються). Утворення глікогену проходить з максимальною швидкістью через 30–40 хв. після прийому їжі. Процеси глікогенезу проходять інтенсивніше після активної м‘язевої роботи.

**3.2 . Глікогеноліз**

При м‘язевій роботі, сильному переохолодженні, голодуванні, емоційному збудженні відбувається посилене споживання клітинами глюкози крові. Рівень останньої повинен був би знижуватися. Проте, у здорових людей при різних функціональних станах, рівень глюкози постійний (120 мг/100см3) з незначними відхиленнями. Стабільний рівень глюкози у крові за різних функціональних станів забезпечується протіканням процесів глікогенолізу (розпад глікогену до глюкози). Глікогеноліз може проходити двома шляхами: гідроліз–повільний, малоефективний процес; фосфороліз–основний шлях розпаду глікогену.

Фосфороліз проходить за участю фосфорилазних ферментних систем, які на першому етапі відщеплюють від молекули глікогену кінцеві залишки молекул глюкози у вигляді глюкозо-1-фосфату:

1.

CH2OH

H H H

(C6H10O5)n H3PO4; (C6H10O5)n-1 OH

фосфорилаза OH OH H O–Р H OH OH

Глікоген Глюкозо–1–фосфат

2. Остання швидко ізомеризується в глюкозо-6-фосфат:

НО ОН

CH2OH CH2O–Р=О

H H H H H H

OH фосфоглюкоізомераза

OH OH H O–P=O OH OH H OН

H OH OH H OH

Глюкозо–1–фосфат Глюкозо-6-фосфат

1. Глюкозо-6-фосфат розщеплюється фосфатазами до вільної глюкози і фосфорної кислоти:

НО ОН

CH2O–Р=О CH2OН

H H H H H H

OH фосфатаза + Н3РО4

OH OH H O–P=O OH OH H OН

H OH OH Н2О H OH

Глюкозо–6–фосфат Глюкоза

**Висновок:**

постійна концентрація глюкози у крові підтримується процесами глікогенолізу які знаходяться під контролем ендокринної системи: гормон глюкагон стимулює процеси розпаду глікогену до глюкози у печінці а адреналін– у м‘язах та інших внутрішніх органах. Процеси глікогенолізу прискорюються при посиленій м‘язевій роботі, переохолодженні, емоційному збудженні. Незалежно від енерготрат організму завжди в печінці залишається певна кількість глікогену (резерв для роботи головного мозку, серцевого м‘язу і «затравочний глікоген»).

Підтримання стану гомеостазу та виконання певних фізичних вправ приводить до посилення процесів розпаду глікогену та окислення глюкози. Останнє може відбуватися за безкисневих (анаеробних) умов та у присутності кисню (аеробне окислення).

Початковою стадією окислення глюкози є анаеробні перетворення.

**3.3 Анаеробний розпад глюкози (гліколіз)**

Умовно поділяють на дві стадії – підготовчу і основну.

Підготовча стадія гліколізу розпочинається з активації молекули глюкози, яка через ряд ферментативних реакцій, перетворюється на дві молекули фосфогліце-ринового альдегіду:

HO OH

CH2OH CH2O–P=O

H H H АТФ АДФ H H H

OH OH H OH гексокіназа OH OH H OH

H OH H OH

Глюкоза Глюкозо–6–фосфат

HO OH

CH2O–P=O НО ОН

H H H O=P–O–CH2 OH

фосфоглюкоізомераза H HO

OH OH H OH

H OH H OH H CH2OH

Глюкозо–6–фосфат Фруктозо–6–фосфат

O

HO–P–OH HO OH

O–CH2 OH O=P–O–CH2 OH

фосфофруктокіназа H HO

H H OH HO OH

OH H CH2ОH H OH H CH2O–P=O

Фруктозо–6–фосфат Фруктозо–1,6–дифосфат

O

HO–P–OH OH

O–CH2 OH CH2–OP=O OH

альдолаза C=O OH + CH2–OP=O

H H OH HO OH CH2–OH CH=O OH

OH H CH2О–P=O CH2–OH

Фруктозо–1,6–дифосфат Диоксіацетонфосфат

OH OH

CH2–OP=O CH2–O–P=O

CH=O OH ізомераза CH–OH OH

CH2–OH C=O

H

Диоксіацетонфосфат Фосфогліцериновий альдегід

**Отже:**

підготовча стадія гліколізу регулюється двома алостеричними факторами: гексокіназними та фосфофруктокіназними ферментними системами, які при низьких концентраціях АТФ у клітині запускають процеси гліколізу. В ході підго-товчої стадії гліколізу витрачається дві молекули АТФ.

**Основна стадія гліколізу** – сукупність ферментативних реакцій по перетворенню фосфогліцеринового альдегіду до піровиноградної чи молочної кислоти.

1. Окислення ФГА. до фосфогліцеринової кислоти за участю ферменту гліцер-альдегід–3–фосфатдегідрогенази (активна частина коферменту – тіолова група та окислена форма НАД+):

CH=O H–C–OH С=О

CH–OH SF SF

CH2–O–P=O + HS–F CH–OH НАД+ НАДНН CH–OH

HO OH CH2–O–P=O CH2–O–P=O

HO OH HO OH

макроергічний зв‘язок

C=O C=O OH СOOH

SF O–P=O CH–OH

CH–OH + H3PO4 OH АДФ АТФ CH2–O–P=O

CH2–O–P=O – HS–F CH–OH OH HO OH

HO OH CH2–O–P=O

OH

1,3-дифосфогліцеринова кислота (ФГК) 3-ФГК

СOOH COOH OH

CH–OH фосфогліцеромутаза CH–O–P=O

CH2–O–P=O CH2–OH OH

HO OH

3–фосфогліцеринова кислота 2–фосфогліцеринова кислота

1. Перетворення фосфогліцеринової кислоти до піровиноградної чи молочної кислоти:

COOH OH COOH OH COOH

CH–O–P=O енолаза (–Н2О) C–O–P=O АДФ АТФ C=O

CH2–OH OH CH2 OH CH3

2–ФГК 2–фосфоенолпіровиноградна кислота (ПВК) ПВК

COOH СООН

C=O НАД НН НАД+ СН–ОН

CH3 СН3 ПВК молочна кислота

**Отже**:

в ході гліколізу виділяється 6–7 % потенціальної енергії глюкози у вигляді 2 молекул АТФ. Кінцевими продуктами гліколітичних процесів окислення вугле-водів є піровиноградна кислота (нормальні фізіологічні умови) чи молочна кис-лота (за недостатньої кількості кисню). Остання, як сильна органічна кислота, «закислюючи» середовище інгібує активність алостеричних факторів, запобіга-ючи перевтомі.

У молочній чи піровиноградній кислоті ще міститься до 93 % потенційної енергії глюкози, яка виділяється в заключній, аеробній фазі перетворення вуглеводів. Аеробна фаза характеризується розпадом продуктів гліколізу (молочної кислоти чи ПВК) до вуглекислого газу і води з виділенням великої кількості енергії. Кін-цевим акцептором електронів і протонів є тканинний кисень. Складається з під-готовчої стадії і циклу трикарбонових кислот.

**3.4 Аеробного перетворення вуглеводів**

Підготовча стадія аеробного перетворення вуглеводів характеризується перетво-ренням ПВК чи молочної кислоти в активну форму ацетил–КоА. На даному етапі виділяється близько 7 % енергії що акумульована у відповідних метаболітах:

CO2

COOH СОО**Н** НАД+ НАД**Н**2

CH–OH НАД+ НАДНН С=О **H**S–КоА СН3–С=О

CH3 лактатдегідрогеназа СН3 піруватдекарбоксилаза S–KoA

**Цикл трикарбонових кислот** – сукупність ферментативних реакцій за участю трикарбонованих кислот. Вони розпочинаються взаємодією ацетил–КоА з щавлево-оцтовою кислотою і закінчуються розпадом яблучної кислоти до щавлево-оцтової кислоти. В ході даних реакцій відновлюється окислені форми дегідрогеназних ферментних систем та виділяється вуглекислий газ:

C=O O=C–COOH C=O

SKoA + CH2 цитратсинтетаза SKoA H–OH – HS–KoA

CH3 COOH CH2 аконітатгідраза

HO– C–COOH

CH2

COOH

ацетил–КоА щавлево-оцтова кислота цитрил–КоА

COOH COOH COOH

CH2 CH2 CH2

HO–C–COOH – H2O C–COOH +H–OH CH–COOH НАД НАДНН

CH2 CH HO–CH ізоцитрат-–

COOH COOH COOH дегідрогеназа

лимонна кислота цис-аконітова ізолимонна

– CO2 – CO2

COOH COOH COOH

CH2  CH2 +НАД+ НАДНН CH2

CH–COOH CH2 +НS–F –CO2 CH2

C=O C=O –кетоглутарат– C=O

COOH COOH дегідрогеназа S–KoA

щавлево–янтарна –кетоглутарова сукциніл–КоА

COOH СOOH COOH

CH2 CH CH2

ГДФ ГТФ CH2 ФАД+ ФАДНН CH H–OH CH–OH НАД+ НАДНН

COOH COOH COOH

янтарна кислота фумарова яблучна кислота

СOOH

CH2

C=O

COOH

щавлево-оцтова кислота

**Отже:**

енергетичний ефект підготовчоїх стадії аеробного окислення становить 6 молекул АТФ (дві відновлені форми НАД-залежних ферментів); енергетичний ефект циклу Кребса {3 НАДНН, 1ФАДНН, 1ГТФ}=12 молекул АТФ.

Поскільки одна молекула глюкози розкладається на дві молекули фосфогліцери-нового альдегіду, то загальний енергетичний ефект аеробного окислення глюкози становить 182=36 молекул АТФ, а враховуючи дві молекули АТФ гліколітич-ного окислення –38 молекул АТФ.

В 38-и молекулах АТФ акумулюється тільки 50 % потенційної енергії глюкози (кДж) а інші 50 % виділяються у вигляді тепла.

**Питання для самоконтролю**

1. Розкрити суть ферментативного перетворення вуглеводів у харчовому тракті людини.

2. Поширення вуглеводів у організмі людини. Фізіологічне значення глюкози.

3. Синтез глікогену з глюкози (глікогенез). Хімізм процесу, фактори регуляції.

4. Розпад глікогену до глюкози (глікогеноліз). Хімізм процесу, фактори регуляції.

5. Характеристика підготовчої та основної стадій анаеробного розпаду (гліколіз). Хімізм процесу, фактори регуляції, енергетичні ефекти.

6. Характеристика підготовчої та основної стадій аеробного розпаду вуглеводів. Хімізм процесу, фактори регуляції, енергетичні ефекти.