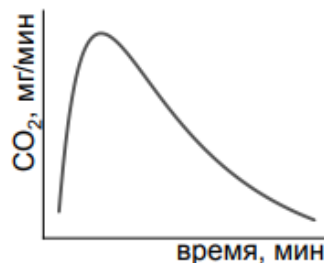


7. Брожение суслу с использованием дрожжей – неотъемлемая часть производства пива. При этом происходит превращение глюкозы в спирт с выделением углекислого газа. Для изучения кинетики брожения при 30 °С и 1 атм было взято 50 г суслу, содержащего 1% по массе глюкозы и 5 г дрожжей. Экспериментально было получено кинетическое уравнение зависимости скорости брожения (в мг CO₂/мин) от времени (мин):

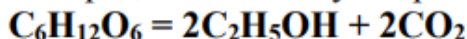
$$r(t) = 17.8(e^{-t/21.6} - e^{-t/4.4})$$



- 1) Запишите уравнение спиртового брожения глюкозы.
- 2) Обоснуйте химический смысл экстремума на графике зависимости.
- 3) С 10 по 30 минуту приведённую кинетическую зависимость можно описать прямой линией. Рассчитайте, сколько спирта (в мг) выделится за эти 20 минут. *Примечание: вспомните, как связаны определённый интеграл от функции и площадь под её графиком.*
- 4) Определите максимальную скорость брожения суслу в приведенных условиях.
- 5) Рассчитайте, сколько глюкозы осталось к моменту достижения максимального брожения, если к этому моменту выделилось 34.3 мл CO₂ (30 °С, 1 атм).

№ 7

- 1) Уравнение спиртового брожения представлено в суммарном виде ниже:



- 2) Количество выделяющегося CO₂ связано с жизнедеятельностью дрожжей. На первом этапе наблюдается рост выделения углекислого газа потому, что их количество растёт экспоненциально. Затем к определенному времени глюкозы становится настолько мало, что ее не хватает для всех микроорганизмов, что приводит к уменьшению их популяции и к спаду выделения CO₂.

- 3) Рассчитаем скорость брожения при 10 и 30 мин по данному в условии уравнению:

$$r_1 = r(10) = 17.8(e^{-10/21.6} - e^{-10/4.4}) = 9,37 \text{ мг CO}_2/\text{мин}$$

$$r_2 = r(30) = 17.8(e^{-30/21.6} - e^{-30/4.4}) = 4,42 \text{ мг CO}_2/\text{мин}$$

Количество выделившегося CO₂ будет соответствовать площади под такой прямой, т.е. необходимо рассчитать площадь прямоугольной трапеции:

$$m(CO_2) = S_{\text{трап}} = \frac{r_1 + r_2}{2} \Delta t = 137,9 \text{ мг}$$

Тогда по уравнению реакции количество вещества спирта будет таким же, как и количество вещества углекислого газа, тогда

$$m(C_2H_5OH) = \frac{46}{44} 137,9 = \mathbf{144,2 \text{ мг}}$$

- 4) Максимальную скорость можно рассчитать, приравняв первую производную скорости брожения к нулю:

$$r'(t) = 0$$

$$\left(e^{-\frac{t}{21.6}} - e^{-\frac{t}{4.4}} \right)' = 0 \Leftrightarrow -\frac{e^{-\frac{t}{21.6}}}{21.6} + \frac{e^{-\frac{t}{4.4}}}{4.4} = 0 \Leftrightarrow \ln \frac{4.4}{21.6} - \frac{t}{21.6} = -\frac{t}{4.4}$$

$$t = \frac{4.4 \cdot 21.6}{21.6 - 4.4} \ln \frac{21.6}{4.4} = 8,79 \text{ мин}$$

Таким образом, максимальная скорость будет достигнута при 8,79 мин — **9,43 мг CO₂/мин.**

5) По условию изначальное содержание глюкозы равно 500 мг. Рассчитаем количество суммарно выделившегося CO₂ по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$n(\text{CO}_2) = \frac{pV}{RT} = \frac{1 \cdot 34,3}{0,082 \cdot 303,15} = 1,38 \text{ ммоль}$$

По уравнению реакции глюкозы израсходовалось в 2 раза меньше — 0,69 ммоль. Тогда оставшееся количество глюкозы равно: $m_{\text{ост}} = 500 - 0,69 \cdot 180 = \mathbf{376 \text{ мг.}}$

Используемая литература: R. H. Hopkins, R. H. Roberts *Biochem J.* **1935**, 29, 919–930.

Рекомендации к оцениванию:

1.	Уравнение реакции брожения – 1 балл (<i>без коэффициентов — 0 баллов</i>)	1 балл
2.	Указание на рост и спад популяции микроорганизмов – 2 балла	2 балла
3.	Расчет количества выделившегося спирта – 2 балла	2 балла
4.	Расчет максимальной скорости брожения – 3 балла	3 балла
5.	Расчет массы оставшейся глюкозы – 2 балла	2 балла
ИТОГО:		10 баллов