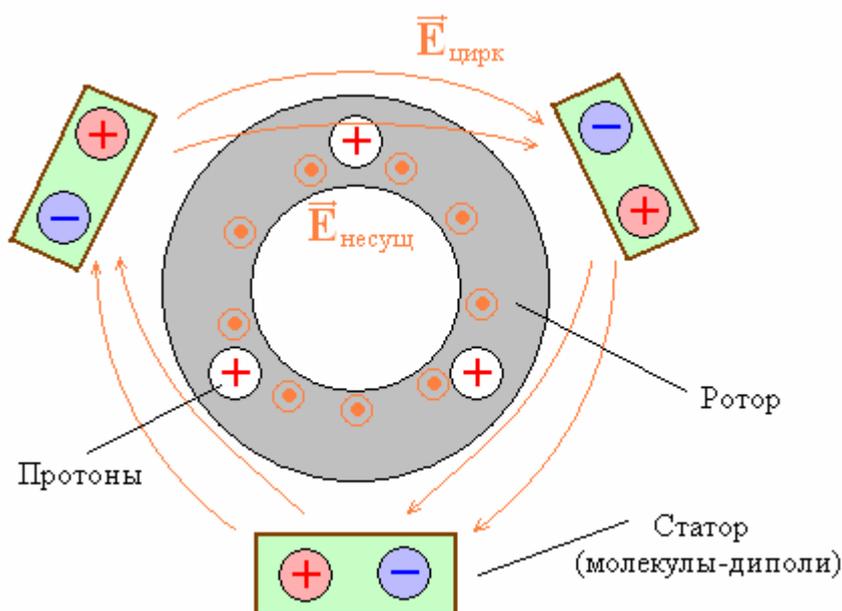


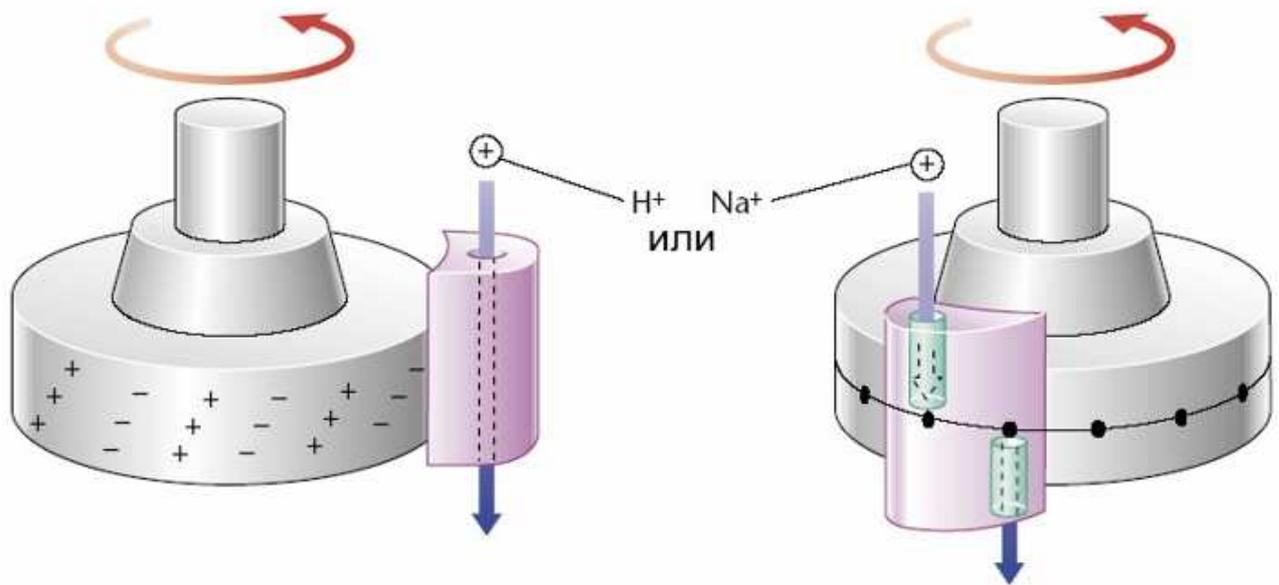
## Молекулярные моторы (*физика*)

1. Принцип работы. Устройство молекулярных моторов во многом сходно с устройством обычных моторов, но есть и существенное различие: ротор обычных электромоторов приводится в движение силами магнитного взаимодействия электромагнитных катушек (соленоидов), тогда как ротор молекулярных моторов движется за счёт электрического (кулоновского) взаимодействия молекул. Ротор состоит из каналов, по которым движутся протоны, а статор – из молекул-диполей, которые создают кулоновское поле (назовём его условно «циркулярным полем»  $\vec{E}_{\text{цирк}}$ ). Циркулярное поле, действуя на протоны внутри ротора, заставляет ротор вращаться. Исследования показали (об этом сказано в условии задачи), что ротор совершает поворот на дискретный угол  $120^\circ$ . Из этого следует схема строения ротора и статора АТФ-синтазы (несколько упрощённая схема показана на рисунке). Она напоминает устройство трёхфазного двигателя, но роль электромагнитных катушек играют протоны и молекулы-диполи. На рисунке изображено три протонных канала, создающие вращающий момент в данный момент времени. На самом деле, как показано на одном из рисунков в условии задачи, каналов десять.



Протоны движутся под действием двух полей: «циркулярного поля»  $\vec{E}_{\text{цирк}}$  и «несущего поля»  $\vec{E}_{\text{несущ}}$ , которое перпендикулярно плоскости рисунка. Это поле поддерживает протонный ток через каналы ротора. Если бы тока не было, ротор бы «застыл» в положении, в котором потенциальная энергия системы минимальна.

На следующем рисунке показана структурная модель другого молекулярного мотора, в котором ротор и статор поменялись ролями (по сравнению с АТФ-синтазой). Из этого рисунка видна также возможность работы молекулярного мотора в обратном режиме – в режиме генератора. Если вращение ротора поддерживается извне (гидролизом АТФ, при котором выделяется энергия), протоны втягиваются в каналы цепочками «минусов» (отрицательных полюсов молекул-диполей), а затем выталкиваются цепочкой «плюсов». Так возникает протонный ток, и энергия макроэргических связей АТФ преобразуется в электрическую энергию.



2. Ток равен  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q}{T} = \frac{eN}{T} = eN\nu$ , где  $q$  – заряд, протекающий через ротор за один оборот,  $T$  – период обращения,  $\nu$  – частота обращения,  $e$  – заряд протона,  $N$  – число протонов, проходящих через ротор за один оборот. В условии задачи сказано, что вращение ротора представляет собой дискретные изменения угла на  $120^\circ$ . За одно такое движение через ротор проходят 10 протонов, а в одном обороте 3 таких движения. Следовательно,  $N = 30$ . Из условия задачи также ясно, что  $\nu = 4$  Гц. Подставляя это в формулу для силы тока, имеем:  **$I \approx 1,9 \cdot 10^{-17}$  А.**

Напряжение оценим из энергетических соображений. Работа тока за один оборот ротора равна  $A = UI$ , где  $U$  – искомое напряжение. С другой стороны, эта работа равна  $A = E\eta$ , где  $E$  – энергия, выделяющаяся при распаде АТФ за один оборот,  $\eta$  – КПД генератора. Для оценки положим  $\eta = 1$  (КПД 100%). Тогда  $UI = E = E_0 \frac{K}{N_A}$ , где  $E_0$  – энергия, выделяющаяся при распаде одного моля АТФ,  $N_A$  – число Авогадро,  $K$  – число молекул АТФ, распадающихся за один оборот. Оно не равно  $N$ . Как видно из рисунков, приведённых в задаче,  $K = 9$ . Отсюда имеем:  $U = \frac{E_0 K}{IN_A} = \frac{E_0 K \nu}{IN_A}$ . Расчёт даёт  **$U \approx 0,15$  В.** Чтобы получить более точное значение, нужно это число умножить на КПД генератора, выраженный в частях.

3. Вращающий момент будем оценивать также из энергетических соображений. Заметим, что момент силы и энергия измеряются в одних и тех же единицах:  $1 \text{ Н}\cdot\text{м} = 1 \text{ Дж}$ . Значит, работа силы за один оборот ротора пропорциональна моменту этой силы. Действительно, пусть плечо силы равно  $d$ , а сила равна  $F$ . Момент равен  $M = Fd$ , а работа за один оборот, как нетрудно убедиться, равна  $A = 2\pi dF$ . Из этих равенств следует:  $A = 2\pi M$ , или  $M = \frac{A}{2\pi}$ . Но

$A \approx E_0 \frac{K}{N_A}$ . Значит,  $M \approx \frac{E_0 K}{2\pi N_A}$ . Расчёт даёт  **$M \approx 1,2 \cdot 10^{-19}$  Н·м.**

4. Вычислим КПД кинезина.  $\eta = \frac{A_{пол}}{A_{затр}} = \frac{FL}{\frac{E_0}{N_A}} = \frac{FLN_A}{E_0}$ , где  $F$  – тяговая сила,  $L$  – длина шага,

$E_0/N_A$  – энергия, затрачиваемая на один шаг (распад одной молекулы АТФ). Расчёт даёт  $\eta \approx 0,57$  (57%).

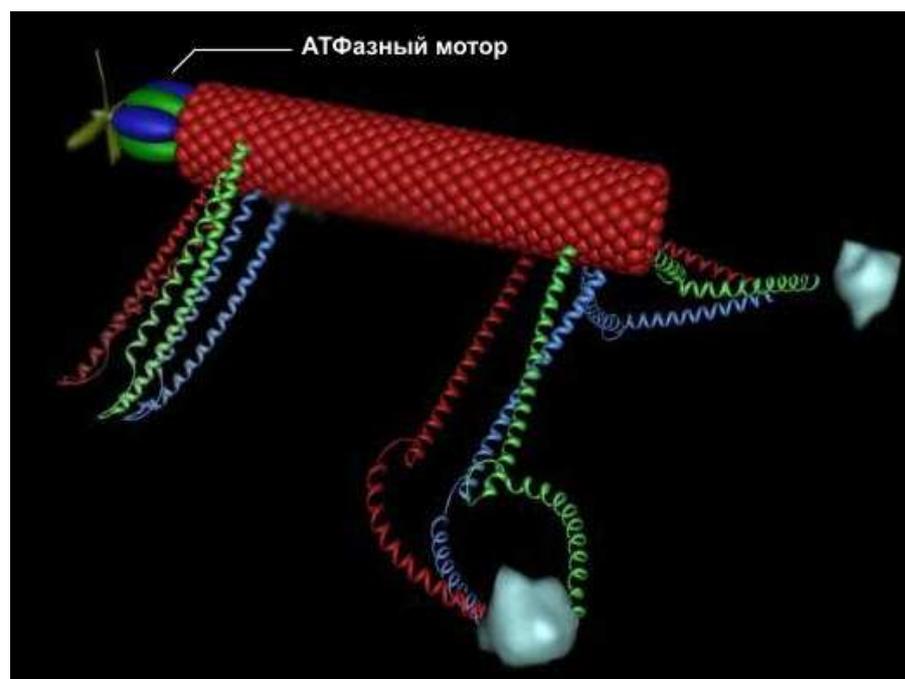
5. Достоинства, недостатки и применение молекулярных моторов.

Биологические молекулярные моторы имеют достаточно хорошие технические характеристики (соотношение размера, массы, генерируемого механического момента и потребляемой энергии). АТФ-синтаза является рекордсменом среди молекулярных моторов своей "весовой категории". По эффективности работы и развиваемой ею силе она существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы. Так, например, молекула АТФ-синтазы приблизительно в 10 раз сильнее актомиозинового комплекса - молекулярной машины, специализирующейся в клетках мышц и различных органах на "профессиональном" выполнении механической работы.

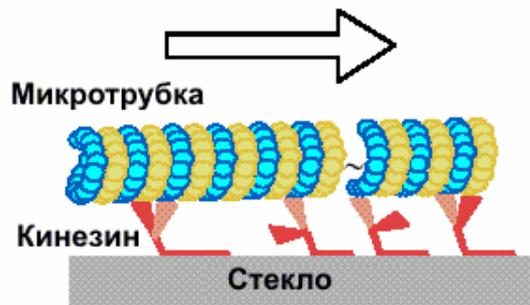
Искусственных аналогов подобных биологических моторов до сих пор не создано. Алексом Зеттлом был продемонстрирован рабочий наномотор с размером ротора около 500 нанометров, но конструктивное исполнение мотора затрудняет его использование в наноустройствах. Мотор был изготовлен на основе кремниевой подложки и золотых электродов. В качестве оси для ротора использовалась нанотрубка.

В то же время можно наладить массовое производство биологических моторов методами геной инженерии и биотехнологий уже сейчас. Это дешевле искусственных наномоторов.

Исследователи заинтересованы в использовании бактериальных жгутиковых моторов в качестве актюаторов и двигателей для наноробототехники. Существуют проекты интеграции моторов на основе АТФ-азы (или АТФ-синтазы) в будущую наноробототехнику. На следующем рисунке показана схема одного из простейших нанороботов, который использует такой мотор. Тело наноробота состоит из нанотрубки, манипуляторы выполнены в виде сложных пептидных цепей. Пропеллер (правда, по последним данным математического моделирования, пропеллерные системы актюации в нано- и микро-размерных вязких средах неэффективны), обеспечивающий передвижение в вязких средах, расположен на АТФ-азе.



Ученые из института Макса Планка продемонстрировали наноконвейер на основе кинезина. Для этого они покрыли молекулами кинезина гладкую стеклянную поверхность, создав что-то вроде ковра, ворсинки которого представляли собой молекулы кинезина. Потом исследователи разместили на этой поверхности ряд микротрубок и микросфер. Исследователи добавили к среде раствор АТФ - и получился огромный "трубочный" конвейер. Если в клетке кинезин шагает вдоль микротрубки сам, то в искусственной системе молекула была жестко закреплена, и свободные концы молекул "шагали" по микротрубкам, передвигая их.



Главный недостаток молекулярных моторов – трудность управления ими. Если мы захотим использовать АТФ-азный мотор для управления наноманипулятором, то задать перемещение ротора в  $10\text{-}20^\circ$  будет практически невозможно, так как дискретность угла поворота равна  $120^\circ$ . Конечно, можно воспользоваться редукторами и прочими преобразователями движения, но это усложнит конструкцию и увеличит размер устройства. Также один из недостатков биомоторов – условие работы в жидкой среде, что существенно ограничивает их круг применения.