

## Человек-Паук: миф или реальность?

*Цель задания:* самостоятельно разобраться в занимательной физике передвижения геккона. Оценить характеристики материала «липучки», возможности его применения для ботинок Человека-Паука, предсказать возникающие при этом проблемы.

**1) (1 балл)** Лапка геккона имеет особую структуру, обеспечивающую большую площадь контакта с поверхностью. «Липучка» на каждом пальце состоит из большого числа щетинок, на щетинках – более маленькие ворсинки с лопатообразными кончиками. Притяжение отдельных ворсинок к поверхности происходит за счёт сил Ван-дер-Ваальса, которые действуют на очень маленьких расстояниях и резко уменьшаются при увеличении расстояния между поверхностями. Эта сила универсальна и ее величина мало зависит от типа поверхности, а разветвленная структура ворсинок позволяет получить хороший контакт с поверхностью любой текстуры и разделить вес геккона на множество маленьких сил.

Щетинка «прилипает» к поверхности как лента скотча: ее сложно отклеить, прикладывая силу вдоль поверхности, но гораздо легче отсоединить, если потянуть перпендикулярно поверхности.

Количественные характеристики «липучек»:

- 14400 щетинок на  $1 \text{ мм}^2$ ,
- длина щетинки 100 мкм,
- на каждой щетинке 400-1000 ответвлений,
- ширина лопаточек 200 нм,
- силы притяжения отдельных ворсинок-лопаточек (десятки мкН)

Примечание: наиболее весомым аргументом при выставлении оценки являлось упоминание межмолекулярного взаимодействия – сил Ван-дер-Ваальса.

**2) (1 балл)** Расчет массы геккона.

Сила сцепления одной лапки с поверхностью:

$$F = S_{\text{лапы}} \cdot F_{\text{удельная}} = 10 \text{ Н (каждая лапка способна выдержать груз в 1 кг)}$$

Масса геккона:

$$m = S_{\text{лапы}} \cdot F_{\text{удельная}} \cdot \frac{n \cdot \text{эффективность}}{g} = \frac{2 \cdot 1 \text{ см}^2 \cdot 10 \text{ Н} / \text{см}^2 \cdot 0,03}{10 \text{ Н} / \text{кг}} = 0,06 \text{ кг} = 60 \text{ грамм}$$

$n$  – минимальное количество точек опоры (при беге геккон в каждый момент времени опирается **только на 2 лапки**, две другие оторваны от поверхности).

Примечание: балл снижался за

- расчет для  $n=1$  (геккон не прыгает на одной лапке!) или  $n=4$  (при беге геккону все же приходится отрывать лапки от поверхности);
- расчет для 3-х лап (снижался в меньшей степени).

**3) (1 балл)** Для удержания геккона (60 г) используется лишь 0,04% щетинок. Оставшаяся часть щетинок либо не «приклеивается» к поверхности, либо служит «неиспользованным» запасом прочности. Поэтому, если к поверхности «прилипнут» и будут предельно нагружены **все** щетинки, то они смогут выдержать максимальный груз:

0,06 кг удерживают 0,04% щетинок

$x$  кг удержат 100% щетинок

$$x = 0,06 \cdot 100\% / 0,04\% = 150 \text{ кг}$$

*Для сравнения:* в среднем, когда прилипают не все щетинки, но используется весь запас прочности прилипших щетинок, геккон способен выдержать груз:

$$m = F \cdot \frac{n}{g} - m_{\text{геккона}} = S_{\text{лапы}} \cdot F_{\text{удельная}} \cdot \frac{n}{g} - m_{\text{геккона}}$$

То есть, при опоре на 4 лапки это примерно 4 кг.

Примечание: балл снижался за

- умножение на долю используемых ворсинок вместо деления на нее.

**4) (2 балла)** Для Человека-Паука примем массу равной 60 кг.

Считаем липучку квадратом, сторона которого будет равна:

$$\sqrt{\frac{m_{\text{человека}} \cdot g}{n \cdot F_{\text{удельная}} \cdot \text{эффективность}}} = \sqrt{\frac{60 \text{ кг} \cdot 10 \text{ Н/кг}}{n \cdot 10 \text{ Н/см}^2 \cdot 0,03}} = \frac{45 \text{ см}}{\sqrt{n}}$$

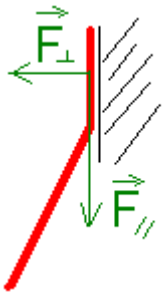
где n – минимальное число конечностей при передвижении.

Для n=1 (если считать, что основная нагрузка идет на 2 ноги Человека-Паука) минимальная сторона квадрата равна 45 см, для n=3 (если считать, что Человек-Паук передвигается на 4-х конечностях с одинаковыми «липучками») минимальная сторона квадрата равна 26 см (засчитывался любой из ответов).

Примечание: балл снижался за

- расчет площади, без оценки линейных размеров из полученной величины;
- расчет на 2 либо 4 точки опоры (меньший запас прочности в момент, когда одна конечность отрывается);
- расчет без учета эффективности.

**5) (2 балла).**



Один ботинок может выдержать параллельную поверхности нагрузку, равную:

$$\frac{S_{\text{ботинка}} \cdot F_{\parallel \text{удельная}}}{g} = \frac{a^2 \text{ см} \cdot 10 \text{ Н/см}^2}{10 \text{ Н/кг}} = a^2 \text{ кг}$$

Что для стороны квадрата 26 см и 45 см составляет, соответственно, 376 и 2025 кг.

Как было упомянуто в первом пункте, перпендикулярная нагрузка будет меньше (т.к.  $F_{\perp \text{удельная}}$  меньше  $F_{\parallel \text{удельная}}$ ). Ее можно оценить из

следующих соображений: когда геккон бежит по потолку, то каждая его лапа выдерживает перпендикулярную нагрузку не меньше  $0,06/2 = 0,03$  кг. При этом

$$F_{\perp \text{удельная}} = \frac{0,03 \text{ кг} \cdot 10 \text{ Н/кг}}{1 \text{ см}^2} = 0,3 \text{ Н/см}^2, \text{ что в 33 раза меньше } F_{\parallel \text{удельная}}. \text{ Поэтому минимальная}$$

предельная перпендикулярная нагрузка составит соответственно 11,3 и 60,8 кг.

Однако такой ботинок тяжело резко оторвать от поверхности, но можно отклеить, медленно потянув с небольшим усилием за край. Как же геккон ухитряется быстро бегать? Лапка геккона – сложный живой механизм. При «отклеивании» лапки отрываются не все щетинки сразу, лапка разбивается на отдельные маленькие одновременно и независимо открепляемые поверхности благодаря одновременному напряжению множества разных групп мышц. Поэтому, чтобы научиться быстро бегать, на ботинках Человека-Паука необходимо дополнительно создать специальный механизм «отлипания» от поверхности.

Таким образом, быстрое передвижение *затрудняют* либо *большая сила отрыва* от поверхности, либо *большое время отрыва*. Или необходимо особое строение лапок, как у геккона, и его особые навыки.

Все это *не даст* Человеку-Пауку возможности быстро передвигаться. Ситуация в некотором смысле эквивалентна передвижению человека по мокрой грязи, при котором сила отрыва конечности (за счет атмосферного давления,  $F = S \cdot p$ ) может доходить до нескольких тысяч ньютонов, что сравнимо с максимальными нагрузками, которые способна выдержать «липучка» Человека-Паука.

Еще одно «волшебное» свойство лапок геккона – способность к самоочищению: мелкие пылинки легко «стряхиваются» с лапок. Это дает геккону возможность передвигаться по широко распространенным в природе пыльным поверхностям. Однако пылинки уменьшают площадь контакта с поверхностью, таким образом, уменьшая силу связывания с поверхностью. Поэтому «липучка» будет легче отрываться, что может привести к *увеличению* скорости передвижения, но при очень *значительном* загрязнении – к *невозможности* удержаться на поверхности.

**б) (1 балл)** Краткий рассказ про наноматериал с похожей иерархической структурой. Наиболее очевидный пример – искусственные «щетинки» на основе углеродных нанотрубок (есть на сайте [nanometer.ru](http://www.nanometer.ru) - [http://www.nanometer.ru/2007/06/27/carbon\\_nanotube\\_3652.html](http://www.nanometer.ru/2007/06/27/carbon_nanotube_3652.html)).

Примечание: наиболее частым аргументом для снижения оценки было отсутствие описания конкретного материала, наличие только размытого описания принципа его работы.

Общее примечание:

Баллы снимались за:

- отсутствие в расчетных пунктах решения каких-либо расчетных формул (непонятно, каким образом полученные цифры);
- арифметические ошибки, приводящие к кардинально другому результату, и, как следствие, к неверным выводам.

Авторам решений, продемонстрировавшим хорошее понимание сути вопроса или предложившим оригинальные идеи, за недочеты и ошибки снижалось меньше баллов.

Результаты **идентичных решений** делились на количество представивших их авторов.

**ИТОГО: 8 баллов.**