

Скидка 15 процентов

А.МИНЕЕВ

В ПОВЕСТИ Н.НОСОВА «ВЕСЕЛАЯ СЕМЕЙКА» есть все от хорошего детектива – интрига, динамичный сюжет, жертвы, момент отчаяния и, наконец, счастливый финал. Как вы, наверное, помните, речь в ней идет о двух школьниках, Коле и Мише, которые задумали построить инкубатор и вывести цыплят из куриных яиц, и о том, что же из этого вышло.

Эта повесть для младшего школьного возраста оказалась любопытной тем, что в ней *детально* описаны все тонкости процесса «высиживания» (так в жизни) или «инкубации» (так в повести) цыплят из яиц. Данных, приведенных в книге, вполне достаточно, чтобы сформулировать и решить ряд интересных физических задач и, кроме того, сделать несколько обобщений и попытаться объяснить некий возникающий парадокс.

Чтобы напрасно не мучить читателя, сформулируем один из этих парадоксов сразу. Дело в том, что в течение периода инкубации яйцо теряет 15% своей массы. Казалось бы, ну и что? Оказывается, эта величина относительной потери массы, 15%, одинакова для яиц *всех* живущих на Земле птиц – как для куриного яйца массой 60 грамм, так и для яйца колибри массой 0,2 г и даже для яйца королевского страуса массой 1,5 кг. Этот парадокс и нашел отражение в заглавии, которое сформулировано на современный «рыночный» лад – «Скидка 15 процентов».

Итак, постараемся пройти по страницам повести «Веселая семейка» с ручкой и калькулятором, делая комментарии и оценки, затем обобщим полученные результаты, а в конце нашего рассказа постараемся применить полученные знания для самой крупной птицы, которая когда-либо жила на Земле. Масса этой слоновой птицы, или эпиорниса, обитавшей в районе Мадагаскара, составляла 500 кг, ее высота достигала 3 м, а яйцо имело массу около 10 кг.

Соответствующие величины масс для ряда различных птиц приведены в таблице (эти данные заимствованы из «Новейшего справочника необходимых знаний (от альфы до омеги)»). Из повести «Веселая семейка» будем использовать некоторые цитаты в качестве эпиграфов к отдельным разделам.

Таблица

Птица	Масса птицы	Масса яйца
Слоновая птица (эпиорнис)	500 кг	10 кг
Страус	90 кг	1,5 кг
Императорский пингвин	45 кг	500 г
Лебедь-шипун	10 кг	350 г
Белый аист	3 кг	115 г
Серебристая чайка	1,5 кг	90 г
Домашняя курица	2,5 кг	60 г
Ворон	1,2 кг	20 г
Сорока	300 г	10 г
Скворец	90 г	6 г
Воробей	35 г	3 г
Красная колибри	1,6 г	0,2 г

Температура

– В инкубаторе должна быть все время одинаковая температура – тридцать девять градусов. – Почему тридцать девять? – Потому что такая температура бывает у курицы, которая сидит на яйцах.

– Разве у курицы бывает температура? – говорю я. – Температура бывает у человека, когда он болен.

А действительно, почему 39 °С? Может, у курицы в момент высиживания *повышенная* температура (как



предположил Коля в повести)? Оказывается, нет. Ведь это только у плацентарных млекопитающих (к которым принадлежим и мы) нормальная температура тела меняется в пределах 36–37 °С. У сумчатых (пример – кенгуру) она составляет 34–36 °С, у однопроходных млекопитающих (утконос) уже 30–31 °С. А вот у птиц нормальная температура тела существенно выше и составляет 39–41 °С. Таким образом, температура высиживания 39 °С является естественной температурой тела птицы.

Как создать и поддерживать постоянную температуру в инкубаторе? В повести была использована большая консервная банка с водой, которая нагревалась снизу с помощью тепла от электрической лампочки. От банки была проведена трубка к фанерной коробке с яйцами. Нагретая вода проходила по трубке и обогревала ящик. В принципе, такая конструкция может поддерживать постоянные температурные условия в течение всего периода инкубации. Но осуществимо ли это в курятнике или на вольной природе?

Нет. И в книге Носова на эту тему есть полезное рассуждение учительницы Марьи Петровны, сделанное уже после того, как эксперимент успешно закончился: «Зародыши могут выдержать довольно длительное охлаждение, – сказала Марья Петровна. – Ведь наседка не сидит все время на яйцах. Раз в день она сходит с гнезда для того, чтобы покормиться, и яйца остывают. В инкубаторах тоже остужают яйца раз в день, чтобы зародыши развивались, как в природных условиях, но гораздо опаснее их перегреть...»

Итак, наседка иногда ненадолго покидает гнездо (курица – раз в день, грубо – на час). Кроме того, время от времени яйца нужно переворачивать. На эту тему в повести характерна следующая перепалка между Колей и Мишей: «Ты зачем инкубатор открыл? Может быть ты думаешь, что цыплята на другой день выведутся? – Ничего я не думаю, – говорю я и хочу объяснить, что яйца нужно поворачивать через каждые три часа».

Действительно, курица нагревает яйцо только с одной стороны, и чтобы перепад температур был невелик, яйцо нужно периодически поворачивать. Этот перепад должен быть примерно таким же, как за время отсутствия наседки.

Длительность высиживания, влажность и вентиляция

Градусник все время исправно показывал 39 градусов. – Хорошо идет дело! – радовался Мишка. – Если все обойдется благополучно, то через 21 день у нас будут цыплята. Целых 12 штук. Веселая будет семейка.

И действительно, время, за которое вылупляются цыплята, составляет 21 день.

Для нескольких сотен видов птиц была исследована зависимость длительности высиживания в инкубаторе $t_{\text{инк}}$ от массы яйца $M_{\text{яйца}}$, которая может быть представлена таким усредненным соотношением:

$$t_{\text{инк}} = 12 \cdot M_{\text{яйца}}^{0,22},$$

где время измеряется в сутках, а масса – в граммах.

Отметим еще некоторые условия, которые связаны с поддержанием жизнедеятельности в гнезде или инкубаторе: из яйца испаряется вода, туда поступает кислород и оттуда отводится углекислый газ. По этому поводу приведем следующие высказывания в повести:

«В инкубаторе должен быть влажный воздух, потому что если воздух будет сухой, то из яиц сквозь скорлупу будет испаряться много жидкости и зародыши могут погибнуть. Поэтому в инкубатор всегда помещают сосуды с водой»;

«Потом Мишка принес сверло и просверлил в инкубаторе несколько маленьких дырочек, чтобы углекислый газ мог выходить наружу».

Конечно, в гнезде оба эти условия выполняются, а в инкубаторе их нужно специально обеспечивать.

Куриное яйцо: исходные данные

Вспользуемся книгой «Размеры животных: почему они так важны?» (автор К. Шмидт-Нильсен) и возьмем из нее необходимые нам сведения:

- масса типичного куриного яйца составляет 60 г;
- затраты энергии на развитие цыпленка составляют 30 ккал;
- высиживание происходит в течение 21 суток в тепле при подходящей влажности и периодическом переворачивании;
- за время высиживания масса яйца уменьшается до 51 г (уменьшение на 15%), в ходе чего оно поглощает 6 л кислорода и выделяет 4,5 л двуокиси углерода и 11 л водяного пара.

Некоторые энергетические оценки

За время инкубации яйцо поглощает 6 литров кислорода, который поддерживает энергетику развития зародыша. Так как один моль любого газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 литра, то 6 литров соответствуют 8,6 граммам кислорода. Окисление кислорода сопровождается выделением энергии – удельная энергоемкость этого процесса около 14 кДж/г, поэтому поглощение 8,6 г кислорода дает 120 кДж, или 30 ккал энергии. Последнее число совпадает с тем, которое приведено в указанной книге.

Если взять затраченную энергию (120 кДж) и поделить ее на время инкубации (21 день), то средняя мощность обменных реакций за время высиживания до появления цыпленка составит 0,07 Вт. Для птиц мощность обменных реакций P , т.е. интенсивность метаболизма, связана с их массой $M_{\text{птицы}}$ следующим образом:

$$P \approx 5 \cdot M_{\text{птицы}}^{0,75},$$

где мощность измеряется в ваттах, а масса – в килограммах. Заметим, что зависимость мощности от массы для птиц та же, что и для млекопитающих, но коэффициент перед массой здесь больше (5 – для птиц, 3 – для млекопитающих), что связано с большей температурой тела у птиц. Для только что родившегося цыпленка эта формула дает интенсивность метаболизма около 0,6 Вт. Сопоставление средней мощности метаболизма

(0,07 Вт) и мощности в конце высиживания (0,6 Вт) приводит к выводу, что в яйце в течение инкубации в среднем обменные реакции протекают почти на порядок менее интенсивно, чем в конце.

Этот парадокс может быть разрешен тем, что по мере развития зародыша интенсивность метаболизма растет. Соответствующая ориентировочная кривая приведена на рисунке 1. Для такой зависимости средняя интенсивность метаболизма за время высиживания

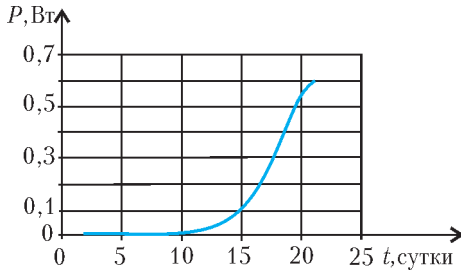


Рис.1. Зависимость интенсивности метаболизма эмбриона цыпленка от времени

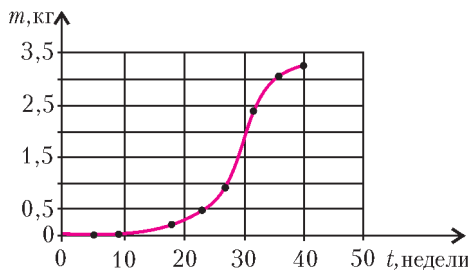


Рис.2. Зависимость массы человеческого эмбриона от времени

действительно существенно меньше максимальной. При построении кривой, изображенной на рисунке 1, были использованы интуитивные соображения о быстром (экспоненциальном) росте метаболизма в начале процесса и постепенном замедлении его к концу.

В качестве обоснования подобного типа кривых приведем вид зависимости интенсивности метаболизма от времени в случае вынашивания человеческого детеныша. Будем отталкиваться от данных по зависимости массы человеческого эмбриона от времени, изображенной на рисунке 2. Теперь перейдем от зависимости массы от времени к зависимости от времени для интенсивности метаболизма. Для этого воспользуемся уравнением, связывающим массу организма с интенсивностью метаболизма:

$$P(t) = N_c P_c + E_c \frac{dN_c}{dt}.$$

Здесь N_c – число клеток в организме, P_c – интенсивность метаболизма клетки, E_c – энергия, идущая на образование одной клетки. Масса организма просто выражается через массу одной клетки и их количество: $m = m_c N_c$. В результате появляется возможность по известной зависимости $m(t)$ получить временную зависимость для интенсивности метаболизма $P(t)$, изображенную на рисунке 3. При построении этой кривой были использованы следующие известные значения величин: $m_c = 3 \cdot 10^{-9}$ г, $E_c \approx 2 \cdot 10^{-5}$ Дж, $P_c \approx 1 \cdot 10^{-11}$ Вт.

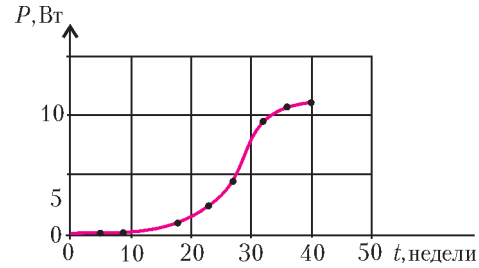


Рис.3. Зависимость интенсивности метаболизма человеческого эмбриона от времени

Как уже говорилось, яйцо за время инкубации выделяет 11 литров водяного пара. Поскольку 1 моль (т.е. 18 грамм) водяного пара при нормальных условиях занимает объем 22,4 литра, то 11 литров соответствуют 8,8 граммам. Так как масса яйца в ходе высиживания уменьшается с 60 до 51 г (на те же 9 г), то это уменьшение происходит главным образом из-за испарения воды. При удельной теплоте испарения воды около 2 кДж/г на испарение 9 г воды требуется энергия порядка 20 кДж. Эта величина существенно меньше общих затрат за время инкубации (120 кДж), и ею в первом приближении можно пренебречь.

Поры в скорлупе яйца: диффузия водяного пара

Еще раз воспользуемся данными из указанной книги о размерах животных:

- толщина скорлупы 0,35 мм;
- скорлупа имеет площадь поверхности 70 см², ее пронизывают примерно 10⁴ пор, диаметр каждой поры 17 мкм.

При температуре 39 °С давление насыщенного водяного пара близко к 55 мм рт. ст. (т.е. 0,073 атм), а давление водяного пара в гнезде, согласно справочным данным, составляет 35 мм рт. ст. Это соответствует уровню влажности порядка 60 %.

Оценим время испарения водяного пара через поры в скорлупе. Для этого воспользуемся соотношениями из статьи «Листья улыбаются» (см. «Квант» №4 за 2006 г.) для задачи Стефана:

$$t_{\text{исп}} = \frac{V}{\Gamma_{\Sigma}}, \quad \Gamma_{\Sigma} = N \Gamma_1, \quad \Gamma_1 \approx 4aD \frac{n(1-f)}{n_b}.$$

Здесь Γ_{Σ} и Γ_1 – скорости испарения, полная и сквозь одну пору. Подставив в эти соотношения объем яйца $V = 60$ см³, радиус поры $a = 0,85 \cdot 10^{-3}$ см, общее количество пор $N = 1 \cdot 10^4$, коэффициент диффузии $D = 0,22$ см²/с, концентрацию молекул воды $n_b = 3 \cdot 10^{22}$ см⁻³, концентрацию молекул водяного пара (при температуре 39 °С) $n = 2,7 \cdot 10^{18}$ см⁻³, относительную влажность $f = 0,6$, получим время испарения $t_{\text{исп}} \sim 2,6$ суток! Поскольку в действительности за 21 сутки испаряется только 15 % воды, то это означает, что водяной пар где-то существенно замедляет свое движение.

Оказывается, что поры в скорлупе, в отличие от устьиц на поверхности листа, представляют собой довольно длинные каналы, и именно в них происходит

существенное замедление выхода водяного пара. Поскольку толщина скорлупы куриного яйца 350 мкм, а диаметр поры 17 мкм, то отношение длины поры к ее диаметру составляет около 20. При распространении водяного пара по такой длинной поре потери давления Δp определяются законом Пуазейля:

$$\Delta p = \frac{32\eta lv}{d^2},$$

где η – вязкость, v – скорость движения пара, l и d – длина и диаметр поры, соответственно. Поэтому потери давления Δp прямо пропорциональны отношению l/S , где $S = \pi d^2/4$ – площадь поры, а проницаемость поры, т.е. обратная потерям давления величина пропорциональна S/l .

Длина поры в зависимости от массы яйца меняется так (по 367 видам птиц):

$$l = 5,126 \cdot 10^{-2} \cdot M_{\text{яйца}}^{0,456},$$

где длина измеряется в миллиметрах, а масса – в граммах. Суммарная площадь пор составляет

$$S_{\Sigma} = 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{яйца}}^{1,236},$$

где площадь измеряется в квадратных миллиметрах, а масса – в граммах. В итоге зависимость проницаемости скорлупы δ от массы яйца $M_{\text{яйца}}$ можно выразить отношением

$$\delta \sim \frac{S_{\Sigma}}{l} \sim \frac{M_{\text{яйца}}^{1,236}}{M_{\text{яйца}}^{0,456}} \sim M_{\text{яйца}}^{0,78}.$$

Тогда за все время инкубации испаренная масса водяного пара $\Delta M_{\text{исп}}$ будет прямо пропорциональна массе яйца:

$$\Delta M_{\text{исп}} \sim \delta \cdot t_{\text{инк}} \sim M_{\text{яйца}}^{0,78} \cdot M_{\text{яйца}}^{0,22} \sim M_{\text{яйца}},$$

а отношение $\Delta M_{\text{исп}}/M_{\text{яйца}}$ окажется одинаковым для всех видов птиц!

Итак, «усушка» приводит к появлению внутри скорлупы небольшого свободного пространства. Оно получается естественным образом в ходе испарения воды через скорлупу, но оказывается важным еще по одной причине. Имея такую свободу движения, цыпленок может размахнуться (это, конечно, громко сказано), стукнуть клювом по скорлупе и выйти в мир. Значит, скорлупа должна быть достаточно прочной, чтобы устоять под действием веса птицы и дополнительных нагрузок при периодическом переворачивании яиц, но треснуть при ударе клюва тщедушного цыпленка. Подобная задача обсуждалась в «Занимательной физике» Я.И.Перельмана, где было показано, что выпуклая форма яйца позволяет выдерживать довольно большие *внешние* нагрузки. Так, скорлупа яйца страуса разрушается при внешней нагрузке около 1200 Н. В то же время даже слабый удар птенца клювом *изнутри* способен пробить эту скорлупу.

А что со слоновой птицей?

Слово «эпиорнис» означает «величайшая из птиц». Эти нелетающие птицы (рис.4) ростом более трех метров обитали на Мадагаскаре вплоть до XVII века. Огромные яйца эпиорнисов (рис.5), вмещавшие до 9



Рис.4. Эпиорнис – величайшая из птиц

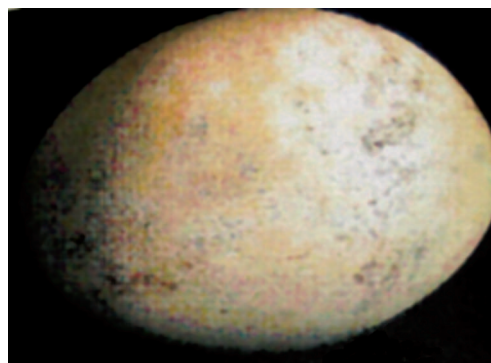


Рис.5. Яйцо эпиорниса

литров воды, жители Мадагаскара использовали в качестве сосудов. Гигантские кости эпиорнисов послужили основой сведений о мифической птице Рух, упоминаемой в сказках «Тысяча и одна ночь».

Длительность высидывания птенца эпиорниса, в соответствии с приведенной выше зависимостью ее от массы, составляет около 90 суток. Если вдуматься, это очень большая величина – целый климатический сезон слоновая птица фактически прикована к гнезду. За время высидывания масса яйца уменьшается с 10 до 8,5 кг. Средний диаметр яйца эпиорниса составляет примерно 25 см, толщина скорлупы 4–5 мм, а масса скорлупы порядка 1,5 кг. Пробить такую «броню» – занятие уже на пределе возможностей. Но это оказалось возможным – благодаря специальным желобкам, расположенным внутри при «входе» в пору.