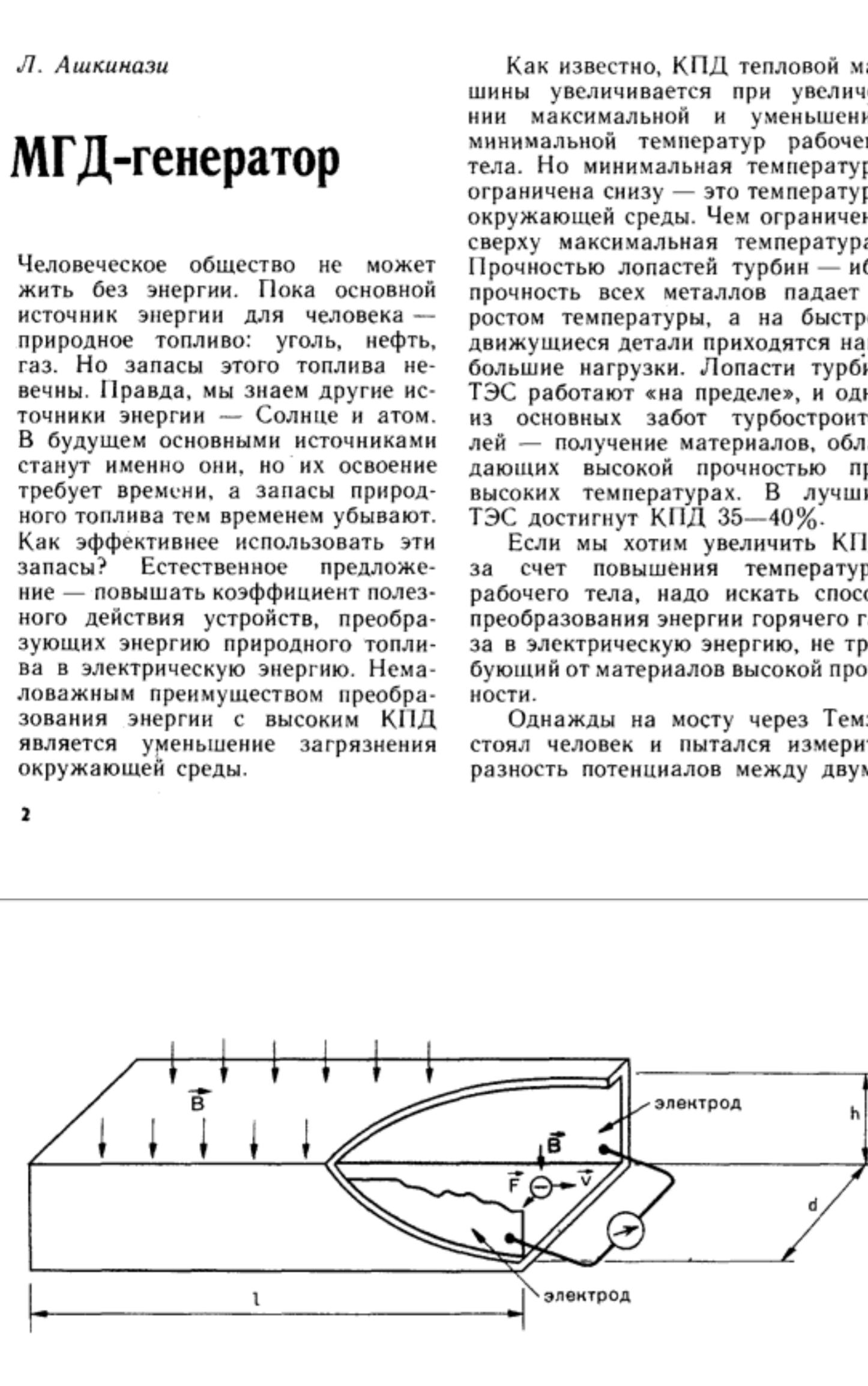


[Лихинаги Л.](#), МГД-генератор.

kvant.mccme.ru



Л. Лихинаги

МГД-генератор

Человеческое общество не может жить без энергии. Пока основной источник энергии для человека — природное топливо: уголь, нефть, газ. Но запасы этого топлива не вечны. Правда, мы знаем другие источники энергии — Солнце и атом. В будущем основными источниками станут именно они, но их освоение требует времени, а запасы природного топлива тем временем убывают. Как эффективнее использовать эти запасы? Естественное предложение — повысить коэффициент полезного действия устройств, преобразующих энергию природного топлива в электрическую энергию. Немаловажным преимуществом преобразования энергии с высоким КПД является уменьшение загрязнения окружающей среды.

2

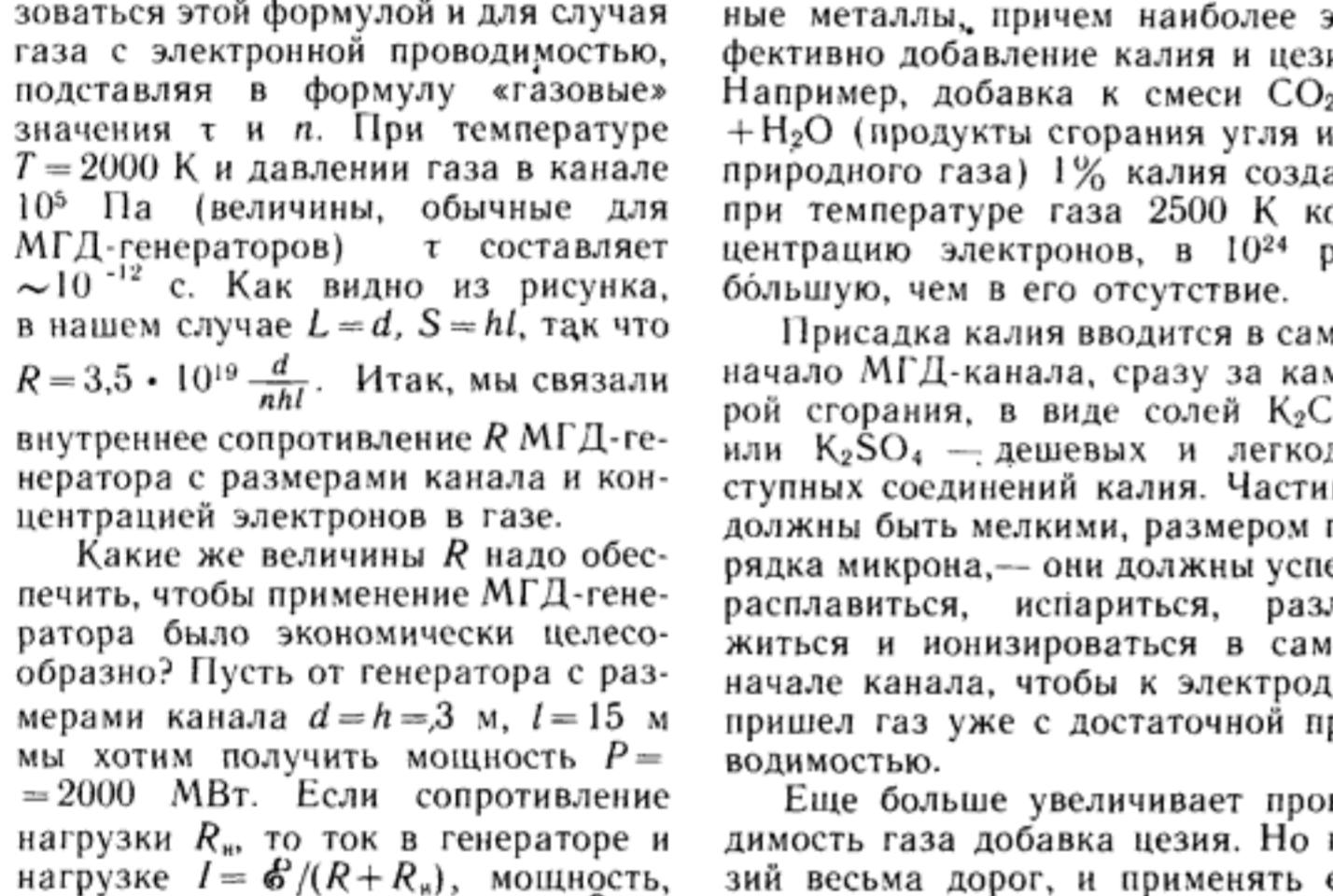
Как известно, КПД тепловой машины увеличивается при увеличении максимальной и уменьшении минимальной температур рабочего тела. Но минимальная температура ограничена снизу — это температура окружающей среды. Чем ограничена сверху максимальная температура?

Прочностью лопастей турбин — либо прочностью всех металлов — падает с ростом температуры, а на быстро движущиеся лопатки приходится наибольшие нагрузки. Лопасти турбин ТЭС работают «на пределе», и одни из основных забоев турбостроителей — получение материалов, обладающих высокой прочностью при высоких температурах. В лучших ТЭС достигнут КПД 35—40%.

Если мы хотим увеличить КПД за счет повышения температуры рабочего тела, надо искать способ преобразования энергии горячего газа в электрическую энергию, не требующий от материалов высокой прочности.

Онажды на мосту через Темзу столица человек и пытался измерить разность потенциалов между двумя

kvant.mccme.ru



электродами, опущенными в воду. Однако разность потенциалов получилась равной нулю, и огорченный Майкл Фарадей (а это было именно он) пошел домой. Неудача Фарадея объяснялась лишь низкой чувствительностью приборов, которыми он пользовался. А разность потенциалов существовала, и она была измерена спустя 19 лет физиком Волластоном. И тогда же Уильям Томсон (lord Кельвин) предложил использовать этот эффект для преобразования энергии движения морской воды во время приливов в электрическую энергию.

Так были заложены идеальные основы нового метода преобразования энергии, который дал возможность использовать природное топливо с большим КПД, чем в традиционных ТЭС. Этот метод называется магнитогидродинамическим.

МГД-генератор

Представим себе трубу, сделанную из электроизолирующего материала и имеющую на двух противоположных стенах изнутри проводящие электроды. Труба помещена в магнитное поле. Внутри трубы движется струя горячего газа. Такова принципиальная схема магнитогидродинамического генератора — МГД-генератора. (Движение горячей струи газа во многих отношениях похоже на движение жидкости. Отсюда название и самого метода, и генератора.) В МГД-генераторе механическая энергия движущегося горячего газа преобразуется в электрическую энергию. Посмотрим, как это делается.

1*

kvant.mccme.ru

Пусть для определенности газ в МГД-канале (так называют трубу с электродами на внутренних стенах) движется слева направо со скоростью v_0 . Итак, сразу на электроду направлено магнитное поле \vec{B} , индукция которого направлена так, как показано на рисунке.

Если в газе, движущемся по МГД-каналу, то свободные электроны, то под действием силы Лоренца $F = e\vec{v} \times \vec{B}$ они будут дрейфовать в газе по направлению к ближайшему к нам (на рисунке) электроду и скапливаться на нем. В результате между электродами на стенах МГД-канала будет создаваться разность потенциалов. Если мы подключим к электродам какую-нибудь электрическую нагрузку, то на цепи нагрузки будет протекать ток.

Итак, задача решена — поместив поток горячего газа в трубу с двумя электродами и магнитное поле, мы сделали генератор электрической энергии.

Механизм возникновения тока в МГД-генераторе такой же, как и в любом электрическом генераторе — ток возникает в проводнике, движущемся в магнитном поле. Но только в электрических генераторах эти проводники металлические, твердые, а в МГД-генераторе это — горячий газ.

Однако это лишь принцип действия. Чтобы понять, при каких условиях будет работать такой генератор, вычислим его параметры — ЭДС и внутреннее сопротивление. Пусть сопротивление нагрузки бесконечно, иначе говоря, нагрузка разомкнута. Каково будет напряжение E на выходе генератора, то есть ЭДС? Оно равно работе по перемещению

kvant.mccme.ru

единичного заряда между электродами. Поскольку эта работа производится против силы $F = e\vec{v} \times \vec{B}$, при ширине канала, равной d , $E = Fd/e = vBd$. Для $d=3$ м, $v=1500$ см/с и $B=5$ Тл E составит 225 кВ — вполне значительная величина, достаточная для практических применений.

Вспомнем на минуту профессора Фарадея и оценим ЭДС для пары электродов, опущенных в Темзу (конечно, это не струя горячего газа, а магнитное поле Земли маленько, это плохо). Полагая $d=30$ м, $v=1$ м/с, $B=10^{-4}$ Тл, получим $E=3 \cdot 10^{-4}$ В. (Такую величину Фарадея измерить не смог...)

Теперь найдем внутреннее сопротивление МГД-генератора.

Как известно, сопротивление металлического проводника длины L и сечения S равно $R = \frac{\rho L}{S}$, где ρ — масса единицы длины проводника, S — концентрация свободных электронов в металле, t — время свободного пробега электронов (см. «Физика» с. 175). Мы можем воспользоваться этой формулой для случая газа с электронной проводимостью, подставляя в формулу «газовых» значений t и ρ . При температуре $T=2000$ К давление газа в канале 10^6 Па (величины, обычные для МГД-генераторов) t составляет $\sim 10^{-12}$ с. Как видно из рисунка, в нашем случае $L=d$, $S=hL$, так что $R=3.5 \cdot 10^{10} \frac{d}{h^2}$. Итак, мы связали внутреннее сопротивление R МГД-генератора с размерами канала и концентрацией электронов в газе.

Какие же величины R надо обеспечить, чтобы применение МГД-генератора было экономически целесообразно? Пусть от генератора с размерами канала $d=h=3$ м, $L=15$ м мы хотим получить мощность $P=2000$ МВт. Если сопротивление нагрузки R_n , то ток в генераторе и нагрузке $I = \frac{E}{R_n + R_g}$, мощность, развиваемая генератором, $P_g = I^2 R_g = \frac{E^2 R_g}{(R_n + R_g)^2}$, мощность, выделяющаяся в нагрузке, $P_n = \frac{E^2 R_n}{(R_n + R_g)^2}$.

Поскольку эта работа производится против силы $F = e\vec{v} \times \vec{B}$, при ширине канала, равной d , $P_g = Fd/e = vBd$. Для $d=3$ м, $v=1500$ см/с, $B=5$ Тл, $E=225$ кВ, то $R_g = 4(R_n + R_g)^2$. Основное, ради чего мы «изобрели» МГД-генератор — высокий КПД. Значит, P_g должно составлять лишь долю единицы часть P_n — скажем, не более 10%. Иначе МГД-генератор окажется не эффективнее обычной ТЭС. Итак, пусть $P_g < 0.1 P_n$, то есть $\frac{E^2 R_g}{(R_n + R_g)^2} < 0.1 \frac{E^2}{(R_n + R_g)^2}$; тогда $R_g < 0.11 R_n$. Отсюда и из условия $R_g = 4(R_n + R_g)^2$ получаем $R_n < 0.022$ Ом. Для того, чтобы при заданных величинах $d=h=3$ м, $L=15$ м получить такое R , надо иметь концентрацию электронов $n > 10^{10}$ электронов/ м^3 . Но откуда взяться в газе столько электронов? При температуре 2000 К газ практически целиком состоит из неионизированных молекул; его можно ионизировать, нагреть, например, до 8000 К. Но ведь при такой температуре плавятся все известные материалы — МГД-канал и камера сгорания просто не из чего будет делать...

Однако концентрацию электронов можно увеличить добавлением к газу легкононизирующихся добавок. Такими добавками или, как их называют, присадками, могут быть щелочные металлы, причем наиболее эффективно добавление калия и цезия. Например, добавка к смеси $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (продукты сгорания угля или природного газа) 1% калия создает при температуре газа 2500 К концентрацию электронов, в 10^4 раз большую, чем в его отсутствие.

Присадка калия вводится в самое начало МГД-канала, сразу за камеру сгорания, в виде солей K_2CO_3 или K_2SO_4 — дешевых и легкодоступных соединений калия. Частицы должны быть мелкими, размером порядка микрона,— они должны успеть расплываться, испаряться, разложиться и ионизироваться в самом начале канала, чтобы к электродам привести газ уже с достаточной проводимостью.

Еще больше увеличивает проводимость газа добавка цезия. Но ценность весьма дорог, и применять его можно только в том случае, если при работе МГД-генератора не будет необходимости в постоянном расходе

присадки и на режиме работы МГД-генератора, на котором горючее входит в камеру сгорания. А это возможно, если горючее — присадка, а горючее — твердое топливо — уголь, калий. В МГД-генераторе с замкнутым циклом — хотя и химически неактивные инертные газы, но зато очень химически активными присадками (цезием, калием и т. д.) — придется решить, что перед МГД-генератором откроются следующие вопросы.

Перспектива применения.

1. МГД-генератор с открытым циклом на природном горючем. Как метод использования энергии как максимум КПД.

2. Найдите хотя бы одно целесообразное решение $(x; y)$ уравнения $x^2 + xy - y^2 = 1$, для которого $x > 100$ и $y < 100$.

3. Выясните, при каких значениях x предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

4. Найдите, для какого a предел последовательности (x_n) существует и определен.

5. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

6. Найдите, для какого a предел последовательности (x_n) существует и определен.

7. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

8. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

9. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

10. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

11. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

12. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

13. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

14. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

15. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

16. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

17. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

18. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

19. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением

$x_{n+1} = \frac{x_n^2}{3x_n - 1}$ и своим первым членом $x_1 = a$.

20. Выясните, при каких значениях a предел последовательности (x_n) , заданной рекуррентным соотношением