

ет интенсивность света только в 40 раз. Технология изготовления высокопрозрачного кварцевого волокна для световодов показана на рисунке 127. Сначала через раскаленную кварцевую исходную трубку пропускают газовую смесь четыреххлористого кремния (SiCl_4) и кислорода, где при высокой температуре (около $1400\text{ }^\circ\text{C}$) протекает реакция с образованием кварца (SiO_2), который оседает на внутренней поверхности трубки. Когда слой нанесенного кварца достигает необходимой толщины, трубку еще больше нагревают, и она схлопывается. Потом полученную цилиндрическую заготовку искусственного кварца нагревают и делают все тоньше и тоньше, доводя диаметр кварцевого волокна до $10\text{--}100\text{ }\mu\text{м}$, после чего снаружи наносят полимерную оболочку с малым показателем преломления. Чтобы избежать примесей, все газовые смеси тщательно очищают, поэтому и прозрачность волокон из искусственного кварца оказывается очень высокой.

В начале 1980-х годов стало ясно, что сделать кварц еще более прозрачным будет очень сложно. Свет с длиной волны $0,75\text{ }\mu\text{м}$ от лазера, работающего на кристалле арсенида галлия-алюминия, терял 40% своей исходной интенсивности, пройдя через толщу 1 км такого стекла. Это казалось пределом возможного. Улучшить прозрачность кварца можно, если использовать более длинноволновое излучение. Ведь известно, что чем короче световая волна, тем больше она рассеивается при прохождении через среду. Однако лазеры с длиной волны $1\text{ }\mu\text{м}$ тоже не устраивали тех, кто занимался волоконно-оптической связью. Оказалось, что молекулы воды, избежать включения которых в кварц не удастся, очень сильно поглощают излучение в области $1\text{ }\mu\text{м}$ и «равнодушны» к излучению с длиной волны $1,5\text{ }\mu\text{м}$, поэтому

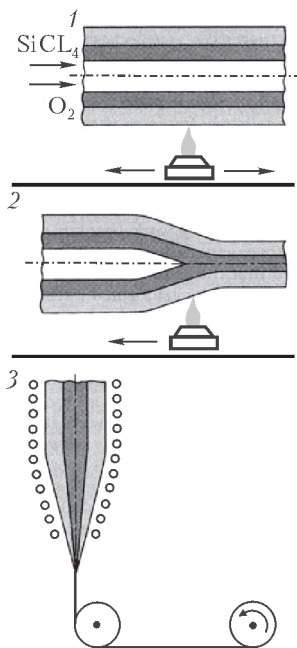


Рис.127. Основные этапы изготовления кварцевого волокна: 1 – осаждение кварца на внутренней поверхности кварцевой трубки при ее нагреве; 2 – «схлопывание» трубки при дальнейшей ее нагревании; 3 – вытяжка кварцевого волокна с диаметром $10\text{--}100\text{ }\mu\text{м}$ и наматывание его на катушку

физиков-лазерщиков попросили сделать лазер именно с такой длиной волны. Вскоре был синтезирован новый класс полупроводниковых соединений, состоящих из четырех компонентов – индий, галлий, мышьяк и фосфор, который излучал на длине волны 1,55 мкм. Это позволило увеличить прозрачность кварцевого стекла до невиданных величин – менее 5% потерь при прохождении через 1 км стекла!

И началось бурное развитие волоконно-оптической связи.

Как мы уже говорили, уменьшая диаметр кварцевого волокна, мы получаем возможность увеличить скорость передачи световых импульсов, избавляясь от волновой дисперсии. Поэтому основу современной волоконно-оптической связи составляют кварцевые волокна с сердцевиной диаметром 5–10 мкм. В тех случаях когда не предъявляются высокие требования к частоте передаваемых световых импульсов, световод состоит из волокон толщиной около 100 мкм.

Важнейшие достоинства современных световодов и волоконно-оптической связи это:

- ничтожно малое затухание сигнала в кварцевом волокне – расстояние между ретрансляторами может достигать 100–200 км, что во много раз превышает такой же показатель для обычных проводных телефонных линий;
- высочайшая пропускная способность, которая достигает десятков Гбит/с;
- нечувствительность к электрическим полям, т.е. к разрядам молний, сигналам радиопередатчиков и помехам от электродвигателей;
- невозможность несанкционированного доступа к передаваемой информации, поскольку световод не создает вокруг себя электромагнитных полей, которые сейчас научились легко регистрировать;
- в десятки или даже сотни раз меньшая, по сравнению с металлическими проводами, масса, что облегчает прокладку кабелей;
- относительная дешевизна и доступность основного материала – кремния;
- стойкость к окислению.

ФИЗИКА АВТОМОБИЛЬНЫХ ПРОБОК

Homo sapiens – человек РАЗУМНЫЙ. Так мы себя называем без тени ложной скромности по отношению к остальным представителям животного мира. Да и конечно, человеческому разуму есть чем гордиться.

Наши предки на протяжении многих тысячелетий пытались сделать жизнь людей более удобной. Когда стало ясно, что удобнее жить и работать вместе, возникли города, потом появились дороги между ними, и наконец – средства передвижения по ним, т.е. автомобили. Ну а когда в городах стало очень много людей, а на улицах очень много машин, начали возникать автомобильные пробки, в которых люди попусту теряют время. Поэтому автомобильные пробки можно считать побочным продуктом цивилизации.

Однако, в отличие, скажем, от экологических последствий цивилизации, причина автомобильных пробок кроется в психологии людей и вполне может быть устранена, если люди будут вести себя РАЗУМНО.

Эта статья адресована тем homo sapiens, кто хочет понять, как образуются автомобильные пробки и как можно их предотвратить.

Наши планы. 1) Попробуем математически описать поведение «среднего» водителя за рулем, а именно то, как он изменяет скорость своей машины в зависимости от расстояния до впереди идущей машины и от ее скорости.

2) Напишем программу для компьютера, с помощью которой «рассадим» несколько тысяч «средних» водителей по одинаковым машинам и запустим гонять их друг за другом по однополосной кольцевой дороге длиной 100 км (что, как известно, соответствует длине Московской кольцевой автодороги). Однако, в отличие от реальных условий, «средним» водителям будет запрещено обгонять друг друга.

3) Когда положение на нашей модельной кольцевой дороге – МКД – стабилизируется, постараемся выяснить, как зависит средняя скорость на МКД от количества машин на ней.

4) Для создания автомобильной пробки на МКД сделаем так, что у некоторой машины, например под номером 500, временно

(на одну минуту) заглохнет мотор и возникнет автомобильная пробка, которая потом в течение долгого времени будет влиять на движение по МКД.

5) Выясним, как характеристики автомобильной пробки зависят от количества машин на дороге и от поведения водителей.

Кинематический портрет «среднего» водителя. Человек садится за руль для того, чтобы быстрее преодолеть путь из точки A в точку B . Поэтому, когда перед ним на дороге нет никаких препятствий, водитель ускоряет свое авто до той скорости v_0 , которую считает разумной в данных условиях. Очевидно, что v_0 для городских улиц (60–80 км/ч), должна быть меньше, чем для скоростных автомагистралей (100–120 км/ч).

Но алгоритм поведения водителя сразу меняется, когда впереди себя он видит машину, следующую в том же направлении. Теперь водитель должен не только использовать скоростные качества своей машины, но и держаться от впереди идущей на некотором безопасном расстоянии, не меньшем чем s_0 . Конечно, если спросить любого водителя, как можно математически записать закон, по которому он ускоряется или тормозит, то вероятность точного ответа относительно мала. Однако предположим, что читателям повезло и они наткнулись на водителя, знакомого с азами кинематики. Вот что он им ответит.

Сначала о разгоне до v_0 , когда впереди не видно никаких машин. Допустим, что максимальное ускорение «среднего» водителя, которое еще не вдавливает его в кресло, составляет $a \approx 2 \text{ м/с}^2$. Тогда формулу разгона можно записать, например, так:

$$\frac{dv}{dt} = a \left(1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right),$$

где v – скорость автомобиля в момент времени t . Видно, что эта формула обеспечивает достижение желанной скорости v_0 и ее поддержание в дальнейшем. Как нетрудно догадаться, показатель степени отношения v/v_0 определяет скорость реакции системы «машина–водитель» и может быть очень высоким у агрессивных водителей, разъезжающих на мощных автомобилях. Четвертая степень в формуле выбрана просто для примера. Да и вообще, формула разгона могла бы иметь совсем иной вид – содержать, например, экспоненту или какие-нибудь другие функции. И все же, данную формулу, наверное, можно считать

самой простой, что очень важно для экономии времени последующих вычислений на компьютере.

Из соображений безопасности интуитивно ясно, что водитель должен держаться от впереди идущей машины на некотором расстоянии, превышающем s_0 , и что s_0 должно увеличиваться с увеличением скорости v . Об этом даже говорится в правилах дорожного движения некоторых стран. Например, в США от водителя требуют увеличивать s_0 на длину автомобиля при увеличении скорости на 5 м/с (т.е. 18 км/ч). Ну а так как длина среднего автомобиля 5 м , то зависимость s_0 от v в этом случае можно записать в следующем виде:

$$s_0 = tv + s_{\min},$$

где t – постоянная времени, равная 1 с , а s_{\min} – минимальное расстояние между машинами, когда они стоят в автомобильной пробке. Для того чтобы машины не царапали друг другу бамперы, положим $s_{\min} = 2 \text{ м}$.

Формулу эту можно прочесть и по-другому. Так как тормозной путь увеличивается пропорционально начальной скорости, то и дистанция между машинами должна быть больше соответствующего тормозного пути. При таком взгляде константа t – это допустимое время торможения при обычной езде.

Однако формула справедлива только для того случая, когда впереди идущая машина имеет такую же скорость, т.е. v . Представим себе, что на впереди идущей машине зажегся красный сигнал тормоза и она уменьшила свою скорость на Δv . Очевидно, что «средний» водитель сразу же тоже нажмет на тормоз, чтобы снизить свою скорость на столько же. Пусть наш водитель не будет очень резко нажимать на тормоз, и отрицательное ускорение машины составит не более $b = 2 \text{ м/с}^2$. Таким образом, на процесс равнозамедленного торможения будет затрачено $\Delta v/b$ секунд, которые мы должны прибавить к t , чтобы сделать безопасным движение даже в том случае, когда впереди идущая машина затормозила. Ясно также, что в случае внезапного ускорения впереди идущей машины все будет наоборот и время t можно уменьшить на $\Delta v/a$, где a – величина комфортного ускорения (2 м/с^2). Таким образом, улучшенная формула для s_0 , справедливая в случаях ускоренного или замедленного движения впереди идущей машины, будет иметь вид

$$s_0 = tv + s_{\min} + v \frac{\Delta v}{a | b},$$

где $a | b$ – означает, что в случае ускорения или торможения берут величины a или b соответственно.

Теперь опишем математически алгоритм поведения «средне-го» водителя, когда оказывается, что расстояние s между ним и впереди идущей машиной отличается от s_0 . Очевидно, что если $s > s_0$, то водитель будет ускоряться, стараясь приблизиться к впереди идущей машине, и наоборот. Формулу, описывающую стратегию регуляции s , можно записать в виде

$$\frac{dv}{dt} = (a | b) \left(1 - \left(\frac{s_0}{s} \right)^2 \right).$$

Здесь $a | b$ имеет такой же смысл, как и в предыдущей формуле, а выбор второй степени был сделан, руководствуясь теми же соображениями, что и выбор четвертой степени в первой формуле, т.е. довольно произвольно.

Поскольку даже «средний» водитель, соблюдая дистанцию, все-таки хочет ехать как можно быстрее, то его стратегия, очевидно, описывается комбинацией правых частей первой и четвертой формул. Так что вполне возможной стратегией «средне-го» водителя может быть среднеарифметическая стратегия, описываемая полусуммой правых частей этих формул:

$$\frac{dv}{dt} = (a | b) \left(1 - \left(\frac{s_0}{s} \right)^2 \right) \cdot \frac{1}{2} + a \left(1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right) \cdot \frac{1}{2}.$$

По машинам! После того как мы узнали, что можно ожидать от «средних» водителей, напишем программу для компьютера, которая имитировала бы взаимодействие трех тысяч таких водителей, едущих по кольцевой дороге длиной 100 км друг за другом не обгоняя. Пусть до начала движения все 3000 машин неподвижны и почти равномерно распределены по длине дороги, а в момент времени $t = 0$ все водители одновременно начинают двигаться в соответствии с полученными формулами для s_0 и dv/dt , где $v_0 = 120$ км/ч. Все машины перенумерованы так, что в начале движения на отметке «0 км» стоит машина с номером «1» и ее водитель через ветровое стекло видит перед собой машину «2», а тот, в свою очередь, видит машину «3» и т.д. Если N – это число машин на дороге, то около отметки «100 км» стоит машина с номером « N », перед которой уже стоит машина с номером «1», и МКД замыкается. Ну а дальше посмотрим, как «живет» наша МКД.

На рисунках 128 и 129 приведены данные моделирования на компьютере – видно, как машины ускоряются и приблизитель-

но через 30 секунд достигают своей оптимальной скорости. Эта скорость, как и следовало ожидать, очень сильно зависит от того, сколько машин на МКД (рис.130). На рисунке 128 обращает на себя внимание очень маленький разброс (около

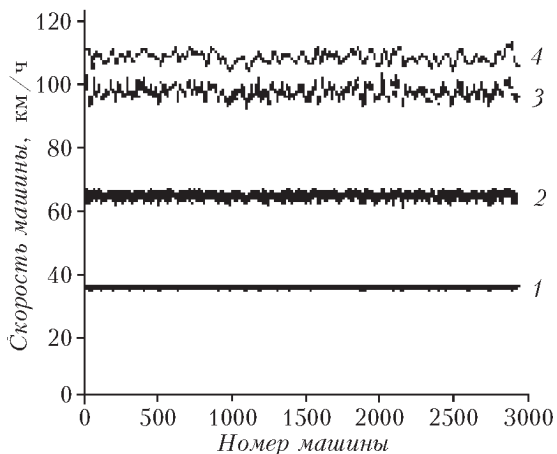


Рис.128. Скорости машин в зависимости от их порядкового номера через 5 (кривая 1), 10 (кривая 2), 20 (кривая 3) и 40 (кривая 4) секунд после начала разгона

5%) в значениях скорости, достигнутой через 40 секунд. Это говорит о том, что система поддержания скорости на МКД, охваченная многими обратными связями, довольно стабильна. Ну а рисунки 129 и 130 демонстрируют всем известную истину – чем меньше машин на дороге, тем до большей скорости можно на ней разогнаться.

Одноминутная «авария».

После того как машины на МКД разогнались и достигли

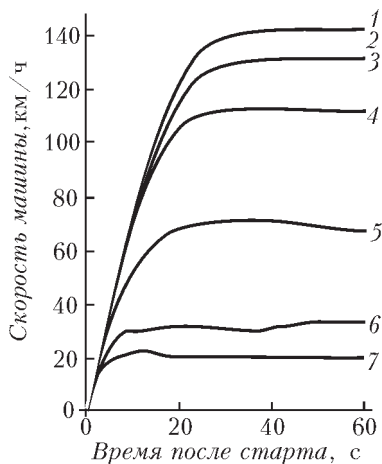


Рис.129. Скорость машины номер «300» в зависимости от времени, прошедшего после восстановления движения, для МКД с разным количеством машин: 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000, 10000 для кривых 1, 2, ..., 7 соответственно

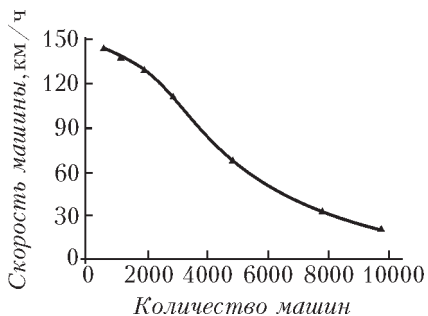


Рис.130. Средняя скорость машин в зависимости от их количества на МКАД

своей оптимальной скорости, спровоцируем возникновение автомобильной пробки на дороге. Для этого остановим машину под номером «500» на одну минуту, «сломав» ее мотор, а потом попросим ее водителя начать движение и догнать уехавшие вперед машины.

Рисунок 131 показывает, как возникает и живет автомобильная пробка, когда на МКАД находятся 3000 машин, т.е. в среднем 30 машин на одном километре. Результаты моделирования показали, что в конце одноминутной остановки машины номер «500» около 50 машин, следовавших за ней, тоже остановились, и таким образом пробка продвинулась почти на полкилометра в сторону, противоположную движению. Поэтому даже после того как машина с номером «500» (первичная причина автомобильной пробки) продолжила свое движение, догоняя ушедший вперед транспорт, остановившиеся за ней бампер к бамперу

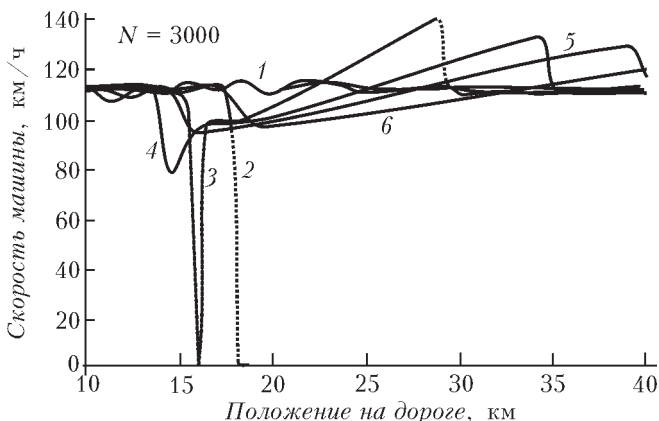


Рис.131. Скорости машин в зависимости от их положения на участке дороги между 10-м и 40-м километрами в различные моменты времени: 1 – до остановки, 2 – в конце одноминутной остановки, 3 – через 5 минут после восстановления движения, 4 – через 9 минут, 5 – через 13 минут, 6 – через 20 минут

машины, став вторичным источником пробки, продолжали поддерживать возобновление нормального движения. Как следствие этого, автомобильная пробка продолжала перемещаться по МКД в сторону, противоположную движению транспорта. Так, через 5 минут после «починки» мотора, когда машина с номером «500» уже проехала около 12 км и догнала уехавшие вперед машины, созданная ею пробка продвинулась почти на 2,5 км от места «аварии». Такое «встречное» движение автомобильной пробки сохранилось даже тогда, когда пробка начала рассасываться и все машины на дороге начали двигаться. Как показало моделирование, скорость встречного движения пробки составляет около 500 м/мин. Через 2–3 минуты после возобновления движения пробка меняет направление своего перемещения на попутное движению транспорта.

Если считать временем жизни автомобильной пробки интервал, когда минимальная скорость на МКД снижена на 30%, то пробка, проиллюстрированная рисунком 131, длилась не больше 10 минут. Известно, что последствия аварий на дороге становятся гораздо более серьезными, если они происходят в часы пик, когда плотность машин на дороге увеличена. Продемонстрируем это на нашей модели, увеличив плотность машин на МКД.

А какие последствия может иметь одноминутная «авария» в часы пик, когда плотность машин возрастает до 40 на километр? Очевидно, что теперь «авария» приведет к остановке большего числа автомобилей, следующих за неисправным. Через одну минуту их будет уже более 60, и все они станут вторичными источниками возникшей пробки, когда машина с номером «500» будет догонять оторвавшийся вперед транспорт. В результате пробка начинает двигаться навстречу движению транспорта с той же скоростью около 500 м/мин, но, в отличие от предыдущего случая, в часы пик пробка может не рассосаться в течение очень долгого времени или даже может стать постоянной. Причиной «вечной» пробки служит динамическое равновесие между количеством машин, останавливаемых этой пробкой, и числом счастливыхчиков, вырывающихся из ее плена.

Возможным «лекарством» от автомобильных пробок в часы пик может быть уменьшение плотности стоящих в пробке автомобилей. К сожалению, как только впереди стоящий автомобиль останавливается, мы стараемся приблизиться к нему как можно плотнее, считая, что этим мы приближаем для себя момент выхода из пробки. Очевидно, что такая стратегия ошибочна. Приближаясь очень близко к бамперу впереди стоящего автомобиля, мы ограничиваем величину ускорения будущего разгона,

а значит, и количество машин, освобождающихся из плена в единицу времени, что может сделать пробку «вечной».

Для того чтобы не создавать «вечных» автомобильных пробок, достаточно снизить свою «желанную» скорость v_0 до той величины, которая оптимальна для данной плотности машин на МКД. Например, для МКД с 4000 машин v_0 могла бы быть порядка 80 км/ч. Какой стала бы ситуация на МКД при одноминутной «аварии» теперь, показано на рисунке 132. Видно, что образование и рассасывание пробки в этом случае очень

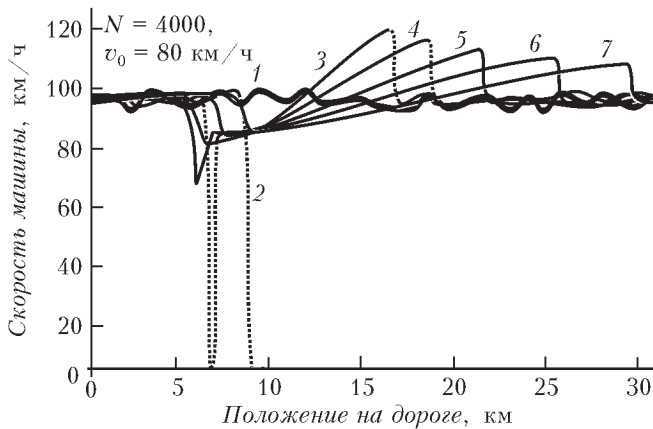


Рис.132. Скорости машин в зависимости от их положения на участке дороги между 5-м и 35-м километрами в различные моменты времени: 1 — до остановки, 2 — в конце одноминутной остановки, 3 — через 5 минут после восстановления движения, 4 — через 7 минут, 5 — через 10 минут, 6 — через 15 минут, 7 — через 20 минут

похоже на то, что происходит при 3000 машинах на МКД и «желанной» скорости 120 км/ч. Отметим, что продолжительность такой пробки, состоящей из действительно РАЗУМНЫХ водителей, составляет всего 8 минут.

Итак, повторяем: «Не приближайтесь к бамперу впереди идущей машины!»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Пособие по физике для покупателей лампочек	5
Глава 2. Почему листья капусты и лотоса всегда чистые?	19
Глава 3. Трение: друг или враг?	24
Глава 4. Вода в воздухе: пар, туман и облака	40
Глава 5. Огонь	49
Глава 6. Ветер: энергия из ничего	56
Глава 7. Какая горка самая быстрая	68
Глава 8. Как мы плаваем	73
Глава 9. Что тянет Гольфстрим на север?	85
Глава 10. Физика стирки и чистки: как моют мыло и ультразвук	89
Глава 11. Тепло и холод: физика и биология	100
Глава 12. Что общего между чудом св. Януария и буровым раствором?	113
Глава 13. Как смотреть сквозь стену?	117
Глава 14. Как океаны говорят друг с другом: подводная акустика	123
Глава 15. Законы Ньютона для паникующей толпы	128
Глава 16. Молния: больше вопросов, чем ответов	140
Глава 17. Как быстрее спуститься на лифте в час пик	149
Глава 18. Кинетика социального неравенства	159
Глава 19. Пыль: дома и в космосе	172
Глава 20. Провода для света: световоды	177
Глава 21. Физика автомобильных пробок	183

Константин Юрьевич Богданов

Прогулки с физикой

Библиотечка «Квант». Выпуск 98

Приложение к журналу «Квант» №6/2006

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева*

ИБ № 83

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская.

Печать офсетная. Объем 6 печ.л. Тираж 3800 экз.

Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: admin@kvant.info

Отпечатано в ОАО Ордена Трудового Красного Знамени

«Чеховский полиграфический комбинат»

142300 г.Чехов Московской области

Тел./факс: (501)443-92-17,(272)6-25-36,

e-mail:marketing@chpk.ru