

Рэлей, Гудерлей и Леон Огородников

Е. Е. МЕШКОВ

В этой статье речь пойдет о том, как саровский школьник Леон Огородников ухитрился вписать свою небольшую страничку в историю исследований физического явления под названием «кумуляция», историю длинную, запутанную, со многими персонажами с громкими именами, историю, начало которой теряется во тьме прошедших веков, потому что начало ей положил какой-то пастух, безвестный гений эпохи неолита, изобретший пастуший бич – устройство, в котором реализуется явление кумуляции, причем весьма эффективно! К тому же механизм действия кумуляции в этом устройстве можно объяснить легко и просто.

Термин «кумуляция» происходит от латинских слов *cumulatio* – скопление и *cumulo* – накапливаю. Этот термин используется в разных областях знаний: в литературоведении, медицине, юридической литературе и даже в социологии. Но наибольшее распространение этот термин получил в физике и технике, обозначая концентрацию энергии взрыва в кумулятивных снарядах, пробивающих самую мощную броню танков. Не меньшую роль кумуляция играет в инерционном термоядерном синтезе, в котором газообразное термоядерное горючее – смесь изотопов водорода, дейтерия и трития сжимается в термоядерной мишени – сферической тонкостенной оболочке, размером немного больше зернышка пшеницы, под действием мощного лазерного импульса, равномерно облучающего поверхность мишени. В результате оболочка мишени начинает схлопываться; вначале скорость внутренней границы оболочки около ... километров в секунду, но в процессе схлопывания вследствие кумуляции скорость нарастает до ... километров в секунду!

Так что же такое кумуляция? И каков ее механизм? Как ни странно, проще всего объяснить механизм этого эффекта на примере действия пастушьего бича. Бич имеет короткую рукоятку (около 0,5 м) и длинную плетку (более 5 м). У рукоятки плетка толстая и постепенно сужается к концу. Вначале пастух резким движением руки приводит в движение плетку и тут же резко

останавливает рукоятку. В результате полет летящей вытянутой плетки останавливается, но не всей ее массы, а только части, прикрепленной к рукоятке, а остальная часть плетки продолжает свободно лететь, но длина заторможенной части все время нарастает, а длина летящей сокращается и стремится к нулю. И поскольку импульс mV , полученный плетью вначале сохраняется, а масса уменьшается (не только за счет уменьшения длины, но и за счет уменьшения толщины летящей части), то скорость летящей части нарастает. В идеале, если масса (m) летящей части плетки стремится к нулю, скорость (V) должна стремиться к бесконечности. Реально такое не происходит, но, тем не менее, скорость кончика плетки достигает 430 м/с!

Это – сверхзвуковая скорость, потому что скорость звука в воздухе при температуре 20 °C равна 345 м/с. С другой стороны, если предположить, что начальная скорость плетки 30–40 м/с, то скорость кончика плетки в конце полета вырастает более чем на порядок, а плотность кинетической энергии, пропорциональная V^2 , на два порядка!

Да, но какая связь этого бича с термоядерной мишенью? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к истории. В 1917 г. лорд Рэлей, выдающийся английский физик, рассмотрел задачу о схлопывании полой сферической полости в несжимаемой жидкости, находящейся под давлением. Он показал, что с уменьшением радиуса r полости радиальная скорость U ее поверхности должна изменяться по закону $U \sim 1/r^{3/2}$. Это означает, что при стремлении $r \rightarrow 0$ скорость U должна расти неограниченно. И при этом неограниченно должна расти плотность энергии жидкости на границе полости.

В 1942 г. немецкий газодинамик Гудерлей опубликовал в журнале *Luftfahrtforschung*, издававшемся в ведомстве Германа Геринга, статью, в которой рассмотрел задачу о сходящейся цилиндрической и сферической ударной волне и обнаружил, что и в этом случае при стремлении радиуса волны к нулю должна достигаться неограниченная плотность энергии. В 1945 г. Ландау и Станюкович получили аналогичный результат

для сходящейся сферической ударной волны.

В реальной ситуации плотность энергии вследствие кумуляции растет, но этот рост ограничен. И ограничения возникают вследствие развития неустойчивости процесса схлопывания полости. В реальности невозможно создать идеальную сферическую форму полости (пузырька) – всегда имеют место отклонения от идеальной формы, т. е. возмущения формы. В процессе схлопывания эти возмущения (даже самые малые) нарастают и, в конечном итоге, полость теряет сферическую форму, и кумуляция прекращается. В этом и заключается негативное действие неустойчивости на кумуляцию. Во второй половине XX в. академик Забабахин, научный руководитель ВНИИТФ, посвятил целый ряд работ проблемам кумуляции и неустойчивости. Он выдвинул гипотезу о том, что любая кумуляция энергии не безгранична, ее действие ограничивается неустойчивостью.

Академик Забабахин в своей книге «Некоторые вопросы газодинамики взрыва» рассмотрел задачу о схлопывании полой сферической оболочки из несжимаемого материала. Всем частям оболочки в начальный момент времени был придан импульс движения к центру, и затем движение продолжается к центру по инерции без какого-либо давления как со стороны внутренней, так и внешней поверхности оболочки. В этом случае, так же как и в задаче Рэлея, при стремлении к нулю радиуса внутренней поверхности оболочки r ее скорость неограниченно растет по закону $V \sim r^{-3/2}$. Так же неограниченно растет давление в материале оболочки в момент фокусировки – в момент, когда радиус внутренней границы приближается к нулю. В то же время скорость наружной границы оболочки стремится к нулю, а в начальный момент времени все части оболочки имели одинаковую скорость! Это означает, что в процессе схлопывания оболочки происходит перераспределение импульса и кинетической энергии от периферических более мас-

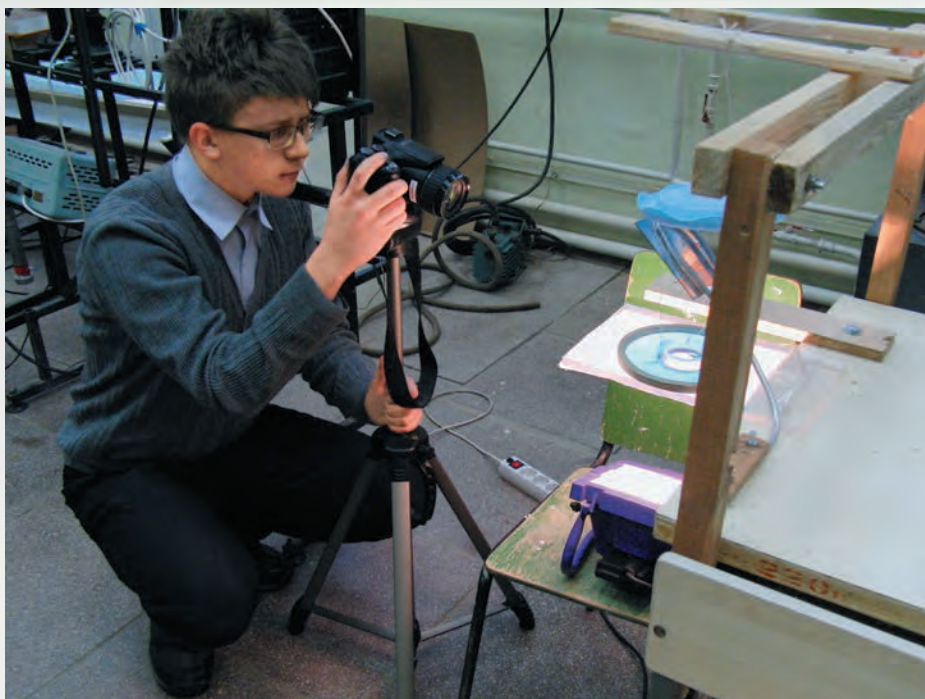


Фото 1. Леон Огородников готовится к проведению эксперимента

сивных слоев к центральным, менее массивным слоям, точно также, как и в случае бича.

Мне в 1960–1980-е гг. случилось принимать участие в исследованиях одного из направлений инерционного термоядерного синтеза – газодинамического термоядерного синтеза. Там термоядерное горючее в мишени обжималось сходящейся сферической ударной волной, создаваемой взрывом сферического заряда взрывчатого вещества. Эти работы велись во ВНИИЭФ по инициативе и под руководством А. С. Козырева, и всех нас живо интересовали проблемы кумуляции энергии.

Однажды во время обсуждения наших текущих дел Козырев рассказал мне об идее простого эксперимента, в котором можно было бы наблюдать явление кумуляции. «Представьте себе, – сказал он, – тарелку с плоским дном, на которой стоит перевернутый стакан. Если налить в тарелку воду и затем быстро выдернуть стакан вертикально вверх, вода устремится к центру в виде симметрично сходящейся волны. Не могли бы вы сделать такой эксперимент?». Мне идея понравилась, и я подумывал о том, как его выполнить; основным препятствием было отсутствие у меня в то время соответствующей аппаратуры для съемки подобного течения. И я так и не собрался сделать такой эксперимент, но этот разговор застрял у меня в памяти и всплыл спустя более чем сорок лет во время разговора

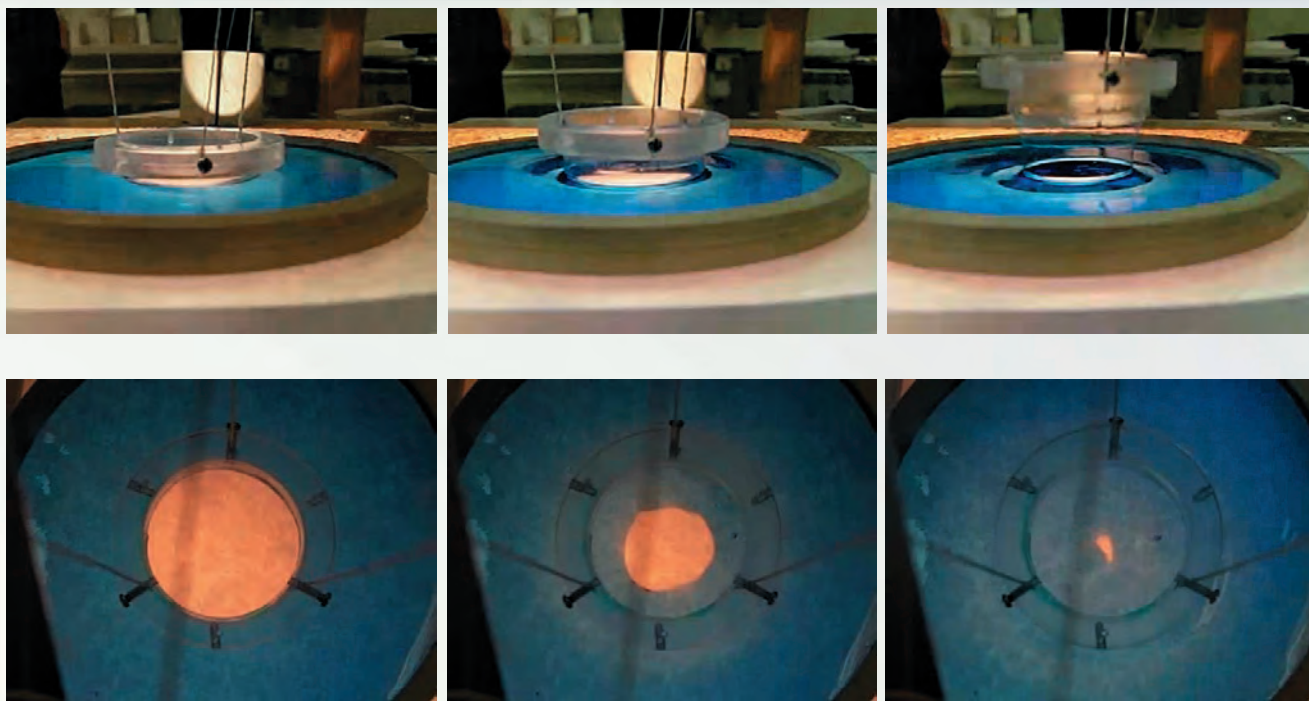


Фото 2. В экспериментальной установке цилиндрический «стакан», стоящий на пластине из оргстекла и отделяющий центральную область от слоя воды, одновременно подвешен на трех нитях. При натяжении нитей «стакан» поднимается вверх и вода устремляется к центру (наверху съемка течения сбоку). Съемка течения в центральной области сверху (внизу справа) ведется через зеркало, установленное между нитями под углом 45° . Течение подсвечивается снизу лампой через слой оргстекла, под которым лежит лист бумаги

с Владимиром Огородниковым, с которым мы работали много лет во ВНИИЭФ. Наш разговор происходил весной 2010 г. во время X Школьных Харитоновских чтений в лицее № 15 в перерыве между выступлениями учеников, участников конкурса по физике, на котором выступали и мои подопечные. Огородников спросил меня, не возьму ли я к себе его внука Леона Огородникова, ученика 9-го класса лицея № 3. Он тут же познакомил меня со своим внуком, который мне понравился. Вот здесь и всплыл у меня в памяти разговор с Козыревым, и я согласился взять к себе Леона.

И начиная с лета 2010 г. мы с Леоном начали работу. Кому-то может показаться, что выполнить эксперимент, предложенный Козыревым, очень просто. Но это только кажется. Уже с первых попыток мы с Леоном убедились в этом. Мы сделали все так, как предлагал Козырев. Поставили стакан в центре подобия плоской тарелки, вот только стакан у нас был без дна. Налили слой воды вокруг стакана, установили на штативе фотоаппарат Casio Exilim EX-F1, настроили его на режим видеосъемки со скоростью 300 кадров в секунду, включили съемку

и ... выдернули стакан строго (как нам казалось) вверх! После обработки результатов съемки на компьютере мы увидели, что течение воды после подъема стакана не имеет ничего общего с симметричным движением воды к центру и тем более не было никакого намека на кумуляцию. Леон расстроился, но я успокоил его и сказал ему, что это в порядке вещей и даже более того – это хорошая примета, если в начале работы получается отрицательный результат.

Конечно, причина нашей неудачи была в движении стакана. Как бы аккуратно мы не старались поднимать его вручную, возмущения его движения при быстром подъеме напрочь разрушали симметрию течения воды к центру. И теперь нашей задачей было разработать такое устройство, которое бы обеспечило строго вертикальное движение стакана при подъеме. Но это еще не все! Кроме всего прочего надо было обеспечить возможность съемки сходящегося течения воды, причем съемку надо было вести в направлении вертикально вниз, в направлении оси стакана. И надо было решить эти задачи при наших скромных возможностях!

Я не буду описывать все детали наших поисков, но к зимним каникулам начала 2011 г.

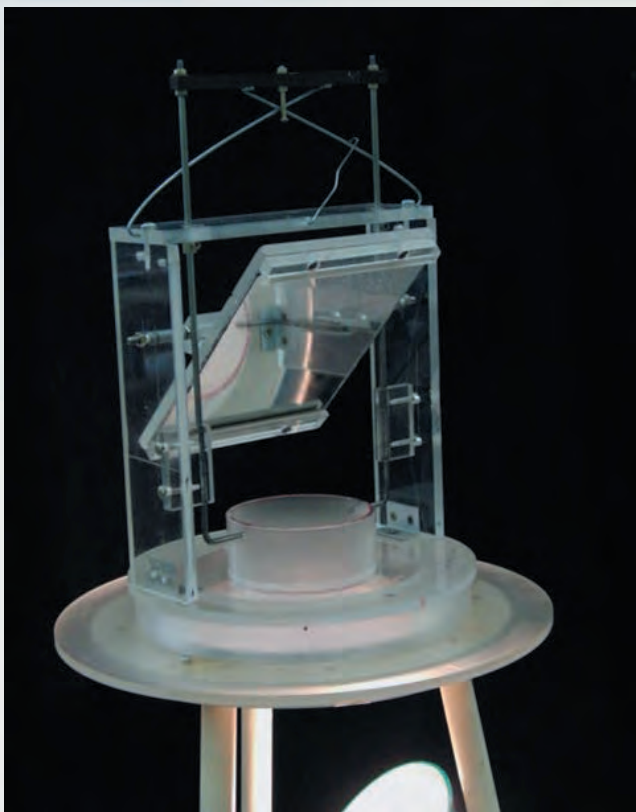


Фото 3. Второй вариант экспериментальной установки. Практически все основные детали выполнены из оргстекла. Здесь цилиндрический «стакан» при подъеме свободно скользит в отверстии в опорной пластине, на которой установлены две стойки с перекладиной. Через перекладину проходят два стальных прутка – тяги «стакана»; последний выдергивается усилием, создаваемым пружинами, которые также закреплены на перекладине. Между стоек на оси подвешено зеркало с возможностью поворота. Вся эта конструкция – опорная пластина со стойками и перекладиной, зеркало, «стакан» с тягами и пружинами – была жестко скреплена винтами и в сборе могла сниматься с «тарелки» в виде кольца, установленного на клею на поверхности диска из оргстекла. В свою очередь, «тарелка» установлена на стальной подставке с отверстием; снизу установлена лампа для подсветки течения в «тарелке»

установка была готова, и Леон начал делать на ней эксперименты (на фото. 1 – установка Леона и он сам). Если не считать фотоаппарата на штативе и лампы подсветки, то вся установка – это буквально «палочки и веревочки». Но эти «палочки и веревочки» действуют. Леон получил фотографии сходящегося к оси симметрии цилиндрического фронта потока воды и даже зафиксировал нарушение симметрии формы фронта. Его выступление на XI Школьных Харитоновских чтениях увенчалось успехом, и он занял первое место на конкурсе.

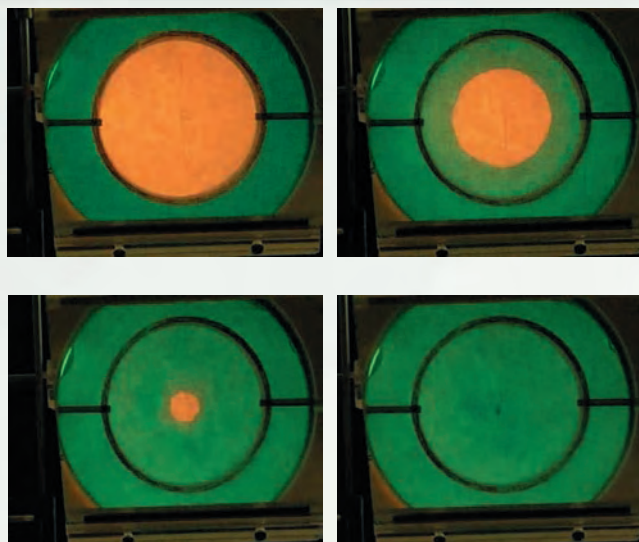


Фото 4. Кадры видеосъемки со скоростью 300 кадров в секунду через зеркало течения, возникающего после быстрого подъема «стакана». Вода (подкрашенная зеленой тушью) устремляется к центру. Фронт сходящегося цилиндрического потока воды практически не возмущен. Результаты измерений радиуса фронта как функции времени (график внизу) показывают, что по мере уменьшения радиуса фронта скорость схлопывания увеличивается, подтверждая факт кумуляции

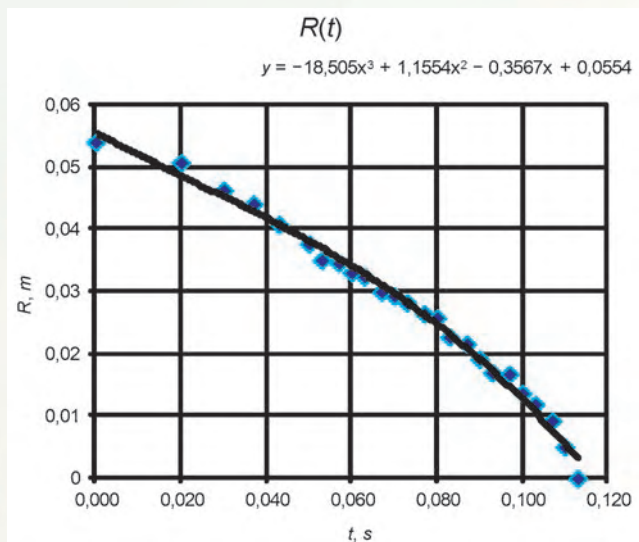


График радиус – время

Итак, мы успешно преодолели этот рубеж, но это был только первый рубеж, только первая ступенька. И впереди нам предстоял еще длинный путь. Установка, которую сделал Леон, выполнила свою задачу, но она была очень несовершенной. Эксперименты на ней показали возможность демонстрации, скорее, явления имплозии – движения, направленного внутрь, но для дальнейших экспериментов и исследований



Фото 5. Леон Огородников и Алла Георгиевская обрабатывают результаты эксперимента

кумуляции она не годилась. Слишком велики были начальные возмущения течения, возникающего после подъема «стакана».

Леон пошел в 11-й класс, и перед ним маячила проблема поступления в институт, а наши исследования кумуляции могли бы способствовать его поступлению. Но мои интересы заходили гораздо дальше. Уже давно на базе гидродинамической лаборатории разрабатывался практикум по газодинамике. И установка, демонстрирующая явление имплозии и кумуляции, существенно дополняла бы этот практикум. Сотрудники ВНИИЭФ, преподающие в СарФТИ газодинамику, и студенты, эту газодинамику изучающие, с интересом знакомились с результатами экспериментов Леона, несмотря на их несовершенство. Поэтому читателю будет понятно мое стремление развить эту методику и создать установку, которая могла бы стать основой лабораторной работы по имплозии и кумуляции. Мы продолжили нашу работу, в которую включились еще и вчерашняя студентка СарФТИ, а теперь сотрудник ВНИИЭФ А. Георгиевская, и сотрудники СарФТИ Г. Б. Красовский, Ю. В. Алеханов и С. А. Ломтев. В результате был создан второй вариант установки, также показанный на фотографии.

Отличительной особенностью конструкции этого варианта была опорная пластина с отверстием, в котором цилиндрический «стакан» свободно скользил во время подъема, но при этом он не болтался и не искажал фронт сходящегося потока. На этой же опорной пластине на двух стойках с перекладиной крепился пружинный механизм, поднимающий «стакан», и зеркало, через которое можно было регистрировать течение при подъеме стакана.

Вся эта конструкция с опорной пластиной, «стаканом», пружинным механизмом и зеркалом была съемной и как целое могла сниматься с «тарелки», которая была образована кольцом, приклеенным к пластине из оргстекла, установленной на металлической подставке с отверстием. Через это отверстие течение в «тарелке» освещалось снизу электрической лампой, а через зеркало производилась скоростная видеосъемка. На кадрах видеogramмы можно видеть, как симметрично сходится в точку фронт потока, а на графике зависимости радиуса фронта от времени – ускорение движения фронта по мере его приближения к центру. Это означало, что здесь действует кумуляция! А симметричная форма фронта означала, что устройство можно использовать для изучения устойчивости течения к



Фото 6. Проведение лабораторной работы по имплозии цилиндрической ударной волны студентами СарФТИ НИЯУ МИФИ

начальным возмущениям, задаваемым экспериментатором.

На очередных XII Школьных Харитоновских чтениях Леон снова занял первое место. Этому в немалой степени способствовало успешное проведение в феврале 2012 г. Всероссийского фестиваля «Люди будущего», в котором особую роль сыграл экспресс-конкурс «Кумуляция в гидродинамике», построенный на разработанной нами установке. Но об этом позже. После успешного окончания школы, Леон не менее успешно поступил в МФТИ и продолжил там образование.

А на базе гидродинамической лаборатории была продолжена разработка лабораторной работы и ее внедрение в учебный процесс СарФТИ. И уже в 2013 и 2014 г. студенты СарФТИ знакомились с явлениями имплозии и кумуляции не только по учебникам, но и могли «пощупать» эти понятия своими руками. Но надо заметить, что в этой истории еще рано ставить точку. Выполненные эксперименты дают представления об имплозии и кумуляции. Но как соотносятся результаты этих экспериментов с практикой настоящих газодинамических экспериментов, например, в которых металлическая

оболочка схлопывается под давлением продуктов взрыва заряда взрывчатого вещества? Есть ли здесь какое-либо соответствие? Можно ли переносить результаты, полученные на лабораторной модели на натуральный вариант? Все вышесказанное относится к модели, «стакан на тарелке», в которой вода налита в «тарелке», но в «стакане» нет воды.

Но может быть и другой вариант модели, где вода не только в «тарелке», но и в «стакане», но уровень воды в «тарелке» h_1 выше, чем в «стакане» h_2 ($h_1 > h_2$). Здесь также после подъема «стакана» возникает симметричный круговой сходящийся поток; в представлениях известной модели «мелкой воды» фронт такого потока является отражением фронта ударной волны. В этой связи возникает вопрос: в какой мере наша модель отражает динамику сходящейся цилиндрической ударной волны?

МЕШКОВ Евгений Евграфович –
зав. учебно-исследовательской
гидродинамической лаборатории СарФТИ,
кандидат физ.-мат. наук