

журнал© Квант НОЯБРЬ 2007 №6 ДЕКАБРЬ 2007

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1970 ГОДА

В номере:



Учредители — Российская академия наук, Фонд поддержки фундаментальной науки и образования (Фонд Осипяна), ИФТТ РАН

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ
РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ю.А.Осипьян

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С.С.Кротов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.Я.Белов, Ю.М.Брук, А.А.Варламов,
А.Н.Виленин, В.И.Голубев, С.А.Гордюнин,
Н.П.Долбилин (*заместитель главного редактора*), В.Н.Дубровский,
А.А.Егоров, А.В.Жуков,
А.Р.Зильберман, В.В.Кведер (*заместитель председателя редколлегии*), П.А.Кожевников,
В.В.Козлов (*заместитель председателя редколлегии*), С.П.Коновалов, А.А.Леонович,
Ю.П.Лысов, В.В.Произволов, Н.Х.Розов,
А.Б.Сосинский, А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин,
В.М.Тихомиров, В.А.Тихомирова, В.М.Уроев,
А.И.Черноуцан (*заместитель главного редактора*)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

А.В.Анджанс, В.И.Арнольд, М.И.Башмаков,
В.И.Берник, В.Г.Болтянский, А.А.Боровой,
Н.Н.Константинов, Г.Л.Коткин, С.П.Новиков,
Л.Д.Фаддеев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.Кикоин

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

А.Н.Колмогоров

Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков,
В.Г.Болтянский, И.Н.Бронштейн,
Н.Б.Васильев, И.Ф.Гинзбург, В.Г.Зубов,
П.Л.Капица, В.А.Кириллин, Г.И.Косоуров,
В.А.Лешковцев, В.П.Лишевский,
А.И. Маркушевич, М.Д.Миллионщиков,
Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов,
А.П.Савин, И.Ш.Слободецкий,
М.Л.Смолянский, Я.А.Сморodinский,
В.А.Фабрикант, Я.Е.Шнайдер

Бюро



Квантум

© 2007, РАН,
Фонд Осипяна, «Квант»

- 2 К 100-летию И.К.Кикоина
5 «Принцип определенности» Кикоина. *С.Кротов*
13 Взрыв. *Л.Белопухов*
13 Полуправильные многоугольники на решетках. *В.Вавилов, А.Устинов*

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

- 16 Не деньги. *А.Васильев*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 17 Задачи М2066–М2070, Ф2073–Ф2077
18 Решения задач М2041–М2050, Ф2058–Ф2062

К М Ш

- 24 Задачи
25 Конкурс имени А.П.Савина «Математика 6–8»
26 Сказка о рыбаке и его слюдяной чудо-лестнице.
С.Дворянинов, А.Жуков

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

- 28 Экспериментальные задачи по физике. *М.Жужа, Е.Жужа, Н.Черная*

ПРАКТИКУМ АБИТУРИЕНТА

- 30 Электрические колебания в нестандартных контурах.
В.Муравьев
35 Об одном случае расположения сферы и пирамиды.
В.Мирошин

КАЛЕЙДОСКОП «КВАНТА»

- 32 «Невозможные» фигуры

ВАРИАНТЫ

- 38 Материалы вступительных экзаменов 2007 года

ИНФОРМАЦИЯ

- 44 Очередной набор в ОЛ ВЗМШ
50 Федеральная заочная физико-техническая школа при МФТИ
54 Новый прием в школы-интернаты при университетах
56 Ответы, указания, решения
62 Напечатано в 2007 году
Вниманию наших читателей (15)
«Квант» улыбается (25)

НА ОБЛОЖКЕ

- I Иллюстрация к статье *Л.Белопухова*
II Коллекция головоломок
III Шахматная страничка
IV Физики и математики на монетах мира



В праздновании 100-летнего юбилея академика
И.К.Кикоина финансовое участие принимает
ОАО «ТЕХНАБЭКСПОРТ»



К 100-ЛЕТИЮ И.К.КИКОИНА

«Принцип определенности» Кикоина

С. КРОТОВ

МОЯ ПЕРВАЯ ВСТРЕЧА С ИСААКОМ КОНСТАНТИНОВИЧЕМ КИКОИНЫМ (ИКК) произошла ровно 40 лет назад (эти строки писались в сентябре 2006 года). В учебном расписании осеннего семестра первокурсников физфака МГУ стояли лекции по первому разделу курса общей физики – по механике, которые должен был читать академик Кикоин. Сама по себе возможность посещать лекции академика (хотя тогда для меня, студента-первокурсника, что академик, что профессор – все это были титулы-добавки, подчеркивающие некий неведомый, но, по-видимому, очень важный статус их носителей) воспринималась как неожиданный поворот судьбы (особенно после школьных уроков по физике).

Не могу сказать, что то, как именно излагал свое представление о механике Ньютона ИКК, способствовало моему прозрению. Но абсолютно точно я впервые получил возможность познакомиться из первых рук с тем, как настоящие физики воспринимают окружающую действительность. Изложение было удивительно (как я это теперь понимаю) физичным и живым, что принципиально отличало его от школьных шаблонов и схем, хотя мы еще в школе самостоятельно перелистывали кирпичи-учебники по механике и Хайкина, и Стрелкова...

На лекциях ИКК очень важным был момент открытия. Без особого труда мне удавалось в целом следить за логикой изложения, хотя иногда не все воспринималось с первого предъявления и требовало самостоятельных размышлений. Это было явно не по-школьному, без излишних упрощений и моделирования, что в полной мере я оценил лишь впоследствии. (Справедливости ради, стоит напомнить, что именно тогда появился на русском языке многотомный курс Нобелевского лауреата Р.Фейнмана, который занял особое положение среди учебников физики. Не скрою, что и по сегодняшний день он входит в число моих настольных книг, являясь образцом построения курса общей физики, в котором явно и органично запечатлена яркая индивидуальность его создателя.)

Едва ли мне было тогда по силам дать истинную оценку этой стороне деятельности ИКК. Помню, что, учитывая вполне естественный студенческий радикализм, некоторые физфаковские радители-материалисты причисляли тогда (как правило, в форме «из уст в уста») Кикоина с его подходом к изложению механики к «чуждым нам» махистам, чем подпускали в наивные студенческие души туман критического недоверия. И лишь спустя много лет, когда я сам стал читать курс общей физики в МГУ и впервые не без удовольствия проштудировал «Механику» Э.Маха, я на этом примере оценил свойственную ИКК самостоятельность подхода к любому делу.

Мне отчетливо запомнилась своеобразная манера ИКК слегка покачиваться из стороны в сторону, когда он что-то рассказывал, а доходя до самого главного, вдруг на мгновение замирать, прикрыв глаза и прислушиваясь к произнесенному, как бы смакуя сказанное. Так было и на одной из первых лекций, когда в связи с обсуждением физических понятий события и времени зашла речь о «Слове о полку Игореве». В то время в исторической литературе появились сомнения относительно даты его написания, но ИКК, с уверенностью ссылаясь на описанное в «Слове...» солнечное затмение, привел свои абсолютно понятные, простые (да, все гениальное просто) и физически обоснованные соображения (основывавшиеся на законах движения планет Солнечной системы) относительно даты обсуждавшегося в произведении события. А следовательно, и о возможной дате появления упоминания о нем в «Слове...».

Следующая, менее формальная моя встреча с ИКК состоялась в Санкт-Петербурге (тогда Ленинграде) на Всесоюзной олимпиаде школьников по физике. Он возглавлял жюри олимпиады и вел его заседание. Представ абсолютно земным собеседником, ИКК на равных общался со всеми присутствующими, независимо от их статуса, при этом безошибочно вникал в суть задач и их решений. Мгновенное проникновение в предмет обсуждения, дополнительное при этом определенной самоиронией, шутками, придавало изначально серьезному и ответственному мероприятию особое человеческое звучание. Оно вызывало во мне ощущение причастности, с одной стороны, к чему-то значительному, а с другой – к просто общему делу.

Статья печатается с сокращениями. Полный текст статьи будет опубликован в специальном выпуске «Библиотечки «Квант», посвященном И.К.Кикоину.

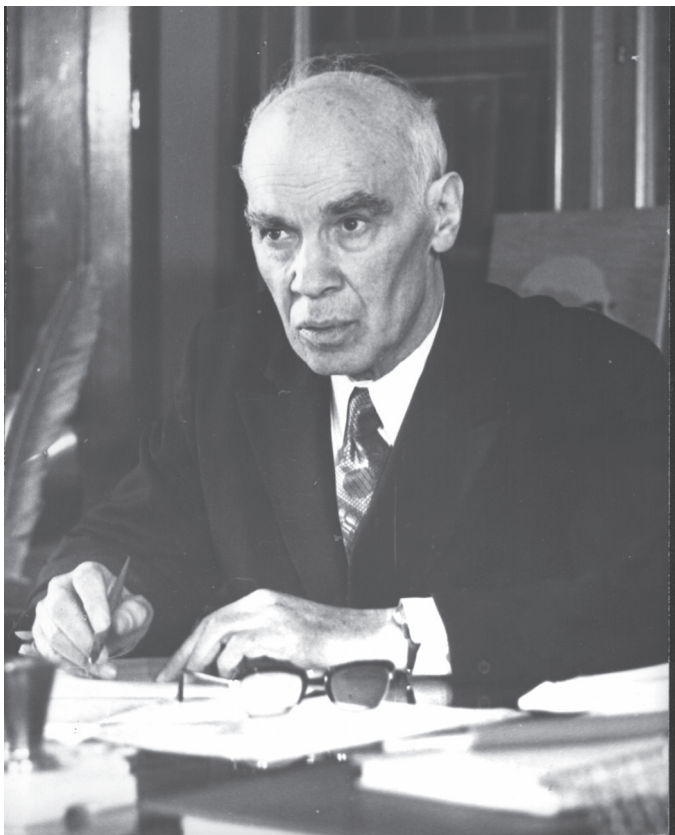
Начав приблизительно в это же время сотрудничать с журналом «Квант» как автор, я стал бывать в помещении редакции на Ордынке. Помню то особое, почти детское удивление, когда, открывая входную дверь, можно было в отдалении, в нише под рукописным приветствием входящим увидеть сиротливую пару настоящих калош, тех обычных черно-красных калош, но очень большого размера. Все это выглядело очень трогательным, а главное, наполняло мой приход особым содержанием. Я понимал, что ИКК здесь. Да, он регулярно бывал, читал, обсуждал, переживал. Ведь счастливые годы создания и первых шагов журнала «Квант» остались позади, и теперь предстоял заботливый родительский глаз.

Именно в помещении редакции на Ордынке несколько лет спустя меня впервые официально представили академику Кикоину. В то лето 1980 года трагически погиб член редколлегии журнала «Квант» Иосиф Шаевич Слободецкий, который, будучи душой журнала, с самого его основания руководил «Задачником «Кванта» по физике. Учитывая, что с 1973 года я стал активным участником олимпиадного движения, входил в предметные комиссии и жюри, участвовал в составлении задач и иногда находил красивые решения, мне было предложено войти в состав редколлегии (наконец-то стать сопричастным) и возглавить этот раздел в журнале. Предложение по тому времени было невероятным, поскольку среди «компониторов» «Задачника» были подлинные корифеи. Судьба явно испытывала мое тщеславие, тестировала на прочность. «Спустившись на землю», я придумал промежуточный вариант своего руководства в виде триумвирата: А.Зильберман, Е.Сурков и я. Свое согласие, а значит и признание всей меры ответственности, я должен был произнести перед ИКК. До сих пор помню его мудрый, спокойный, в чем-то домашний взгляд, в котором одновременно была выражена и вся серьезность поручаемого мне дела. Помню, что, стараясь не обнаружить всех переполняющих меня чувств и не произнести лишних слов, я тогда впервые в жизни дал себе клятву — «никогда ничем не подвести».

ИКК регулярно появлялся на заседаниях редколлегии «Кванта», которые проходили раз в месяц. Для меня это мероприятие означало тогда очень многое. Это была и особая честь, и особое удовольствие, и особая ответственность прямого общения с большим числом

уникальных личностей. Все очень серьезно и заинтересованно обсуждали содержание будущих номеров журнала, живо реагировали на происходящее вокруг. Была удивительно захватывающая творческая атмосфера. Создавалось впечатление слаженно играющего симфонического оркестра, которым дирижировал (почему-то напоминавший мне Евгения Мравинского) академик Кикоин.

Следующие мои воспоминания и переживания связаны с 75-летием ИКК. Поскольку было запланировано специальное заседание редколлегии, мы договорились, что в качестве подарка юбиляру будет выпущен само-



дельный (нетипографский) номер журнала, для которого все руководители традиционных разделов журнала придумают что-то интересное, по возможности с юмором. Я около недели мучился, составляя юбилейный задачник из пяти задач по физике. Не буду здесь воспроизводить условия всех задач, но за одну из них мне до сих пор не стыдно. Вот ее условие: «Требуется оценить энергию связи редколлегии журнала «Квант». Решение: «Чтобы оценить энергию связи редколлегии журнала «Квант», нужно ее разогнать и определить необходимую для этого работу». Как мне казалось, кроме прямого смысла главным в задаче был, если хотите, скрытый подтекст. Ведь не секрет, что «Квант», в силу разных

причин, оказывал на некоторых окружающих и ... раздражающее воздействие. Но благодаря ИКК журнал походил на «локоть, который не укусишь». Поэтому задача вроде бы раздражала недоброжелателей — мол, пусть попробуют. Когда на чествовании мне дали слово для приветствия юбиляра, помимо прочего я, следуя общему руслу заседания, зачитал условия и решения всех пяти задач. Мне показалось тогда, по улыбке и блеску глаз самого ИКК и аплодисментам членов редколлегии, что задачник получился.

Кроме участия в общем подарке, не возбранялось подготовить и индивидуальные сувениры. Зная со слов самого ИКК о его слабости к виртуозам-стеклодувам, создателям вакуумных устройств, я разыскал на физфаке стеклодувную мастерскую. Моя идея состояла в том, чтобы в форме небольшой колбы сделать лампу накаливания, вольфрамовая нить-спираль которой была бы изогнутой в виде написанной фамилии «КИКОИН». Это было несколько проще того, что я хотел

вначале – чтобы спираль была изогнута в форме кикоинской подписи. Не могу сказать, что в результате получился шедевр экспериментаторского искусства. Более того, при включении лампы-колбы в сеть через небольшой промежуток времени после появления долгожданного свечения фамилии нить, как и следовало ожидать, «приказала долго жить». Однако юбиляр был очень великодушен и по достоинству оценил мой прибор одноразового действия. По крайней мере, уходя, он не забыл взять лампу с собой (хотя к этому моменту она уже не работала).

Еще одной запомнившейся мне «авантюрой» с участием ИКК была моя поездка в Швецию в 1984 году (моя первая индивидуальная командировка в капстрану) на Международную олимпиаду по физике в качестве корреспондента журнала «Квант». Вся процедура оформления началась с прямого звонка ИКК первому заместителю министра, который должен был подтвердить Кикоину включение моего имени в список командированных (напоминаю, что я в то время был рядовым ассистентом МГУ) и согласие руководства Министерства просвещения СССР на выделение соответствующих валютных средств. Непосредственное оформление документов заняло не меньше трех месяцев, но времени все равно не хватило – до самого отъезда ничего не было понятно. Наконец, настал такой момент, когда через три дня начиналась олимпиада. Одновременно со мной в Швецию оформлялась команда школьников – участников олимпиады и двух руководителей, в компании с которыми я и должен был лететь. У них все шло по плану – и загранпаспорта с визами, и билеты на самолет, и наличная валюта уже ждали их в министерстве. А моя ситуация, как это часто бывало, зависла – ни да, ни нет. И тогда ИКК без промедления по знаменитой «вертушке» позвонил министру М.А.Прокофьеву (у них, насколько мне известно, были теплые неформальные отношения). ИКК знал, как без лишних слов и эмоций добиваться результатов даже в практически безвыходных ситуациях (он потрясаяще знал нашу систему изнутри). Как впоследствии оказалось, несмотря на полученные ранее заверения второго лица в министерстве, без еще одного прямого звонка Кикоина министру ничего бы не состоялось – система работала в режиме постоянного выжидания удобного момента для отказа. Остановившаяся было машина опять закрутилась. На олимпиаду я полетел с опозданием, совсем один, но полетел. В этом, как потом выяснилось, была по тем временам и своя прелесть. На протяжении всей командировки я принадлежал только себе (может быть, я был слишком наивен). Это была награда за терпение. Возвращались в Москву все вместе. Не стану пересказывать свои ощущения от той поездки, скажу лишь, что все было на уровне чуда, подаренного мне одним жестом (которого могло и не быть) ИКК. И все потому, что он пообещал. Был бы на моем месте кто-то другой, ИКК сделал бы то же самое (и делал, я это точно знаю).

После возвращения из Швеции я позвонил ИКК, и он пригласил меня заехать к нему домой в часы обеда, чтобы рассказать о поездке и обсудить в неформальной

обстановке накопившиеся дела. ИКК с большим вниманием выслушал мои впечатления от олимпиады. Поинтересовался, не младший ли Сигбан (Кай Сигбан – лауреат Нобелевской премии по физике 1981 года, сын Манне Сигбана – Нобелевского лауреата по физике 1924 года) возглавлял Международный оргкомитет олимпиады. В своей догадке он оказался абсолютно прав. Когда я от имени Международного оргкомитета вручил ИКК специальную папку участника олимпиады, он, быстро перелистав ее содержимое, с интересом стал разглядывать карту Стокгольма. Мы вместе нашли на ней здание городской Ратуши, в которой проходил прием, устроенный для участников олимпиады королем Швеции. ИКК отнесся к этому факту с большим одобрением, соглашаясь, что Международные олимпиады школьников вполне могут быть отнесены к разряду событий государственного значения. Узнав, что участников олимпиады разместили в живописном предместье Стокгольма (г.Сигтуна) в очень престижном учебном заведении, в котором воспитывались многие выдающиеся политики и общественные деятели, ИКК вспомнил удивительные подробности, связанные с историей этого города, и опять же оценил королевский размах устроителей олимпиады.

Ушел ИКК внезапно. По крайней мере, для нас. Его хоронили в лютый мороз 30 декабря 1984 года. Я как сейчас помню, что близкие и просто любившие его (да и кое-кто из нелюбивших) всю церемонию прощания простояли без головных уборов. Нахлынуло ощущение какой-то безысходности, покинутости и, я бы даже сказал, незащищенности. Он так много сил и внимания уделял журналу, во все времена был его надежной опорой и защитой, и вдруг мгновенно, без предупреждения все изменилось, ноги перестали чувствовать землю. Время приостановилось...

Мне кажется, что, несмотря на разные предчувствия и ожидания, на около месяца висевшую над журналом завесу таинственности, связанную с недолгим внутри-академическим противостоянием интересов, история распорядилась справедливо. Главным редактором журнала «Квант» Президиум Академии наук назначил директора Института физики твердого тела, создателя одного из подмосковных, как это принято сегодня называть, наукоградов, академика Юрия Андреевича Осипьяна.

С января 1985 года прошло двадцать с небольшим лет. Очень многое за это время изменилось и вокруг, и у нас в журнале. Произошло чудо и доведись мне сегодня встретиться с ИКК, не на все из поставленных создателем журнала «Квант» вопросов я легко бы нашел ответы. Особенно, когда речь заходит о тираже, который, по сравнению с лучшими годами из кикоинских времен, упал почти в 100 раз. Но хочется надеяться, что в целом, с учетом всех имевших место катаклизмов, ИКК остался бы нами доволен. По крайней мере, все эти годы и редколлегия, и редакция, претерпев неизбежные изменения как по числу, так и по составу, старались делать все возможное, а иногда и на грани возможного, чтобы журнал «Квант» оставался верен тем принципам, которые в него заложил ИКК.

К 100-ЛЕТИЮ И.К.КИКОИНА

Взрыв

Л. БЕЛОПУХОВ

Я ПОМНЮ, СЛОВНО ЭТО БЫЛО ВЧЕРА, ТОТ ДЕКАБРЬСКИЙ день ровно пятьдесят лет назад. Пустынная, чуть присыпанная снежком степь неподалеку от Ташкента. На небольшой высоте – несколько десятков людей. Среди них маститые академики и члены-корреспонденты – М.М.Лаврентьев, Л.И.Седов, М.А.Садовский, доктора и кандидаты наук. И мы – молодые ученые, всего лишь несколько лет назад закончившие вуз, а в этот момент разработчики и участники предстоящего события.

Все взоры устремлены на одну точку в степи, где в полутора километрах от высоты виднеется маленький столбик – репер. Три часа дня – в Москве полдень. В те дни в полдень по радио звучали сигналы точного времени – «пи», «пи», «пи». И ровно в момент третьего «пи» что-то произошло. Там, где только что стоял репер, земля стала вздыматься. В степи словно расцвел живой цветок, чьи лепестки поднимались все выше и выше – до 600-метровой высоты, потом загибались и опадали вниз. Не было мощного звука, только дрогнула земля по всей округе, и на тысячи километров по земным недрам разбежалась сейсмическая волна, как при землетрясении. Это и было землетрясение, но не природное, а сотворенное человеком в пустынной местности и поэтому безопасное для людей.

19 декабря 1957 года состоялся уникальный научный эксперимент – мощный подземный взрыв. На глубине 40 метров был взорван заряд взрывчатого вещества, эквивалентный тысяче тонн тротила. Два дня непрерывным потоком возили грузовики от ближайшей железнодорожной станции этот смертоносный груз – пятьдесят железнодорожных вагонов. Эксперимент стал завершающей точкой в научной работе по исследованию подземных взрывов «на выброс» и обоснованию их дальнейшего применения в горном и строительном деле. Это было крупное научное достижение.

Взрыв-разрушитель

Почти у всех людей слово «взрыв» вызывает отрицательные эмоции. Грохот, пламя, разрушения, гибель людей – сегодняшнее телевидение часто «украшает» свои передачи такими сюжетами. Взрывы гремят в военных кинофильмах и современных боевиках. Ветераны войны – от Великой отечественной до афганской и чеченской – знают о взрывах по собственному опыту. А ведь были еще и ядерные («атомные») взрывы. И сейчас в подземных бункерах лежат ядерные заряды, способные уничтожить земную жизнь, если подорвать их все.

Для военных целей люди стали применять взрыв уже почти тысячу лет назад, когда началось использование пороха для артиллерийских и саперных целей. В 1552 году при осаде Казани саперы войска Ивана Грозного (по-видимому, это были иностранные специалисты) произвели подкоп под стены Казанского кремля, и взрывом тонны пороха в нужный момент перед штурмом стена была разрушена. В тротиловом эквиваленте заряд составлял около 50 килограммов.

Апофеозом использования взрыва на войне для уничтожения людей стала Хиросимская трагедия, унесшая десятки тысяч жизней. Ну а самый крупный рукотворный взрыв прогремел 30 октября 1961 года на Новой Земле. Его тротильный эквивалент – $5 \cdot 10^{10}$ килограммов, или 50 миллионов тонн. Больше половины длины земного экватора заняли бы железнодорожные составы, выстроившиеся впритык друг за другом для перевозки такого количества тротила.

Взрывы происходят и в природе. Гром – не что иное как следствие электрического взрыва в канале молнии. Взрывы гремят при извержениях вулканов, происходят в солнечной оболочке. Взрываются звезды – новые и сверхновые, взрываются даже галактики. Правда в космосе взрывы не гремят, греметь там нечему – нет газовой среды достаточной плотности.

В глубине истории теряется время, когда люди впервые стали делать взрывчатые или быстрогорящие смеси – пороха. Как почти все изобретения, это было сделано в Китае для развлечения властителей ракетами и фейерверками. (Любопытно, что и сейчас петарды и фейерверки в России – в основном китайского производства.) Наверное, от таких путешественников, как Марко Поло, арабы и европейцы в Средневековье узнали, что смесь угля, серы и селитры горит так быстро, что с ее помощью можно метать ядра и разрушать стены.

Взрыв-работник

Но уже и тогда порох стали применять в мирных целях. Взрыв становился работником. В том же далеком XVI веке пороховые взрывы использовались в шахтах и на горных карьерах для дробления скальных пород. А первому российскому инженеру – императору Петру I – приписывают изобретение остроумной взрывной «гасилки» пожаров. В бочку с водой помещался пороховой заряд с подведенными к нему огнепроводящими шнурами от огнеопасных мест помещения. При возгорании шнур подрывал пороховой заряд, взрыв которого с большой силой разбрызгивал воду, и она



Серия приведенных в статье фотографий иллюстрирует последовательные этапы мощного подземного взрыва, осуществленного ровно 50 лет назад. В этом уникальном научном эксперименте автор статьи принимал непосредственное участие

гасила начинавшийся пожар. Как и всегда в России, от изобретения до его внедрения – дистанция огромного размера. Пожары продолжали жечь русские города.

Всерьез взрыв стал работником после изобретения динамита в конце XIX века. Дело в том, что пороховые взрывы часто оказывались недостаточно эффективными для дробления твердых скальных пород, таких как гранит, диабаз. Химики изобрели более сильные взрывные вещества – соли гремучей кислоты, нитроглицерин и другие. Но они были очень опасны в применении – при небольших механических ударных воздействиях мог прогреметь взрыв. Хорошим примером такого взрывного вещества является йодистый азот, легко получаемый растворением кристаллического йода в нашатырном спирте. Образующийся белый порошок можно отфильтровать и, пока он не потеряет влагу, перемещать. Но как только влага испарится, достаточно легкой встряски, чтобы произошел взрыв. Энергия такого взрыва невелика, и вреда он не причиняет, но шум получается большой. Вещества этого типа сейчас используются в капсюлях патронов. Они взрываются от удара бойка пистолета или винтовки и провоцируют взрывное превращение основного заряда в патроне.

Динамит более безопасен. Динамит – это различные горючие волокнистые материалы (например, хлопковая вата), впитывающие нитроглицерин (с некоторыми добавками). Нитроглицерин, заполнивший поры наполнителя, оказывается гораздо менее чувствительным к механическим воздействиям. По своей взрывной силе динамит гораздо эффективнее пороха. Это изобретение было сделано шведским химиком и инженером Альфредом Нобелем (отец которого был военным инженером в России в эпоху Крымской войны, а братья были главными создателями нефтяной промышленности на Кавказе). Быстрое распространение динамита в горнодобывающем и строительном деле принесло изобретателю капитал, проценты от которого составляют сейчас несколько миллионов евро в год и по завещанию А.Нобеля являются финансовой основой международных Нобелевских премий.

После изобретения динамита появилась вера в то, что мощные взрывные вещества смогут быть достаточно безопасны в обращении и, увы, при изготовлении артиллерийских снарядов, мин и бомб. Появились такие взрывные вещества, как тринитролуол (тротил или тол) тетранитропентаэритрит (ТЭН), циклотриметилентринитроамин (гексоген) и их смеси. Это произошло еще при жизни А.Нобеля, и он, чувствуя ответственность и сожаление за эту сторону применения новых взрывных веществ, в числе премиальных номинаций завещал премию «За деятельность по сохранению мира».

Где сегодня применяется взрыв?

Сегодня взрыв-работник используется в самых разных областях техники и науки.

В горной и горнодобывающей промышленности – это сейсмическая разведка полезных ископаемых, вскрытие месторождений для их последующей карьерной добычи, взрывная отбойка в шахтах и горных выработ-

ках. Взрывные работы с применением пороха для добывания руд впервые были проведены в России (1617 г.) и уже потом получили распространение в Европе.

В строительном деле – снос конструкций, планировка дорог и площадок в горной местности, создание систем осушительных каналов, образование плотин и перемычек с помощью мощных взрывов.

В водном хозяйстве – углубление дна водоемов и речных фарватеров, уничтожение порогов и перекатов, ликвидация ледяных заторов при половодье. Кстати, первое зафиксированное в истории применение взрывчатых веществ в мирных целях произошло в середине XV века, когда с помощью пороховых зарядов было расчищено от камней и порогов русло литовской реки Неман. Эти работы, предположительно, были произведены итальянскими инженерами.

В нефте- и газодобывающей промышленности – ликвидация аварий бурового инструмента, застрявшего в скважине, повышение нефтеотдачи с помощью создания дополнительной трещиноватости пласта, создание подземных хранилищ нефти и газа, ликвидация пожаров нефтяных и газовых скважин их взрывным пережимом.

В отраслях металлообработки и металлургии – взрывное упрочнение металла, взрывная штамповка и сварка, дробление шлаков и крупного металлолома.

В научных исследованиях – изучение свойств газов, жидкостей и твердых тел при высоких взрывных давлениях и температурах, особенностей химической кинетики, явлений переноса и фазовых переходов в этих условиях, получение на короткое время сверх-сильных магнитных полей (с индукцией до 1500 Тл), изучение «звездной материи» в начальной стадии ядерного взрыва.

Но, пожалуй, самое важное использование взрывов в научных целях – это сейсмическое зондирование недр Земли с помощью сильных взрывов. Таким способом были получены сведения о внутреннем строении Земли – коре, мантии, жидком и твердом ядре, что дало возможность геологии из описательной науки стать полноценной наукой – геодинамикой.

Что же объединяет все эти столь различные аспекты применения взрыва? Что является наиболее характерным в этом необычном и кажущемся таким загадочным явлении природы?

Что же такое взрыв?

В «Физическом энциклопедическом словаре» (издание 1960 г.) дается такое определение: «Взрыв – внезапное изменение физического или химического состояния вещества, сопровождающееся крайне быстрым превращением (выделением) энергии, которое приводит к разогреву, движению и сжатию продуктов превращения и окружающей среды, возникновению интенсивного скачка давления, разрушению и разбрасыванию. В окружающей среде образуется и распространяется особого рода возмущение – ударная волна». Автор этого определения – А.Ф.Беляев, один из моих учителей, под диктовку которого я записал эти фразы





еще в 1950 году на втором курсе Физтеха на специальности «Физика взрыва».

Свыше 30 лет Александр Федорович Беляев руководил лабораторией физики взрывных процессов в Институте химической физики Академии наук СССР. Крупный ученый, обладавший незаурядным экспериментаторским талантом, той тщательностью в постановке опытов и их анализе, которая не оставляет места для сомнений в оценке результатов исследований и в выводах из них. Немаловажная деталь – за многие годы работы этой лаборатории, когда каждый день в железобетонной камере грохотали взрывы (по 130 граммов в тротиловом эквиваленте), не случилось *ни одного* несчастного случая. А ведь опытные заряды создавались из смесей взрывчатых веществ, их формовали, снаряжали детонаторами научные сотрудники и лаборанты, студенты и практиканты. И я помню внимание руководителя ко всем мелочам, его неуклонную суровость и неуступчивость в вопросах тщательного соблюдения правил безопасности, которые так и хотелось иной раз нарушить ради ускорения опыта и, как нам казалось, в конечном счете – ради науки.

Но взрыв остается явлением, которое может быть крайне опасным, особенно при его применении без надлежащего теоретического анализа. Пример тому – известная во взрывном деле «катастрофа в Оппау». На окраине этого небольшого немецкого городка в конце первой мировой войны существовал большой склад аммонийной селитры, которую в Германии научились синтезировать прежде всего для производства артиллерийского пороха взамен ставшей недоступной природной чилийской натриевой селитры. Если натриевая селитра в смеси с углем и серой (порох) легко воспламеняется и быстро горит, то поджечь смеси аммонийной селитры значительно сложнее. В чистом виде она считалась совершенно безопасной. После войны, когда Германия уже не имела права производить оружие и порох, эту селитру стали использовать как удобрение. Но в соединении с влагой воздуха селитра образует скально-трещиноватый монолит, и было решено добывать ее не механическим способом, а как горную породу – откалывать с помощью взрывов динамита. И работа вначале шла успешно, пока однажды в 1920 году весь массив селитры не прореагировал как взрывчатое вещество (а было ее там около 11000 тонн). Городок Оппау был полностью разрушен, число жертв исчислялось многими сотнями.

Сейчас аммонийная селитра – это удобрение в порошке или гранулах, совершенно безопасное с взрывной точки зрения и нехорошее только тогда, когда им злоупотребляют (пресловутые «нитраты»). Но в то же время аммонийная селитра – главная составляющая часть (до 80%) взрывчатых смесей: аммонита, аммотола и динамона, самых употребляемых во всем мире взрывчатых веществ в горнодобывающем и строительном деле. Теория взрыва помогла разобраться в этих «чудесах» с аммонийной селитрой.

Прежде чем возвратиться к анализу определения взрыва по А.Ф.Беляеву, я приведу еще одно определе-

ние взрыва из «Большой советской энциклопедии» (издание 1971 г.). Его автором является старший меня на один курс по Физтеху (и, соответственно, тоже один из учеников А.Ф.Беляева) К.Е.Губкин, которого по таланту можно с полным основанием назвать «блестящим» ученым – в нем способности незаурядного физика-теоретика объединились с пониманием и знанием эксперимента. Вот его определение: «Взрыв – процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. В результате взрыва вещество, заполняющее объем, в котором происходит освобождение энергии, превращается в сильно нагретый газ с очень высоким давлением. Этот газ с большой силой воздействует на окружающую среду, вызывая ее движение. Взрыв в твердой среде сопровождается ее разрушением и дроблением».

Оба определения очень похожи. Они характеризуют взрыв как необычайно сложный процесс, включающий ряд химических и физических явлений. Поэтому невозможно определить взрыв кратко – в первом определении 44 слова, во втором 54. Основные явления при взрыве – выделение энергии, образование сильно сжатого нагретого газа, вовлечение в движение окружающей среды (ее разрушение, если она твердая), образование в этой среде ударной волны.

Самое характерное – внезапность явления

В обоих определениях взрыва настораживает количественная неопределенность характеристик – «внезапное», «крайне быстрое», «интенсивный», «ограниченный объем», «большое количество энергии», «короткий промежуток времени», «сильно нагретый газ с очень высоким давлением». В энциклопедиях, рассчитанных на массового пользователя, такая неопределенность оценок возможно оправдана. Но в научных работах это не допускается. В чем же дело?

Оправданием этой неопределенности может служить разница в масштабах взрывных явлений, разнородность их внутренних процессов. Взрывной характер носит, например, образование микротрещин. Энергия, выделяющаяся при этом, невелика по техническим меркам, чего не скажешь о последствиях, которыми может стать разрушение конструкции или безвозвратная потеря произведения пластического искусства.

Пример из совсем другой области – взрывное, скачкообразное изменение интенсивности магнитного поля в земной атмосфере, когда к Земле подходит выброшенная солнечным взрывом порция плазмы. В земном магнитном поле возникает (в результате явления электромагнитной индукции) ударная магнитогазодинамическая волна, в которой интенсивность магнитного поля возрастает в несколько раз. Изменение плотности энергии земного магнитного поля при этом невелико – оно много меньше, например, изменений тепловой энергии земной атмосферы. Последствия же нам известны.

В обоих этих экзотических, разнородных по своей внутренней ситуации случаях взрыва есть общее – фактор внезапности для человека. Пожалуй, это и следует выделить в определении взрыва как самое



характерное. В первом случае внезапность характеризуется долями секунды (психологическое «было» и «не стало»). Во втором – временем порядка минуты, но для человеческого организма это тоже внезапность – он не успевает своевременно перестроиться и приспособиться. Но почти во всех других взрывных процессах внезапность характеризуется временем нарастания эффекта (например, давления в звуковой волне), много меньшим естественной человеческой меры – нашего пульса.

Сложность понимания взрыва заложена в объяснении этой самой внезапности – почему освобождение энергии происходит так быстро и почему освобожденная энергия так быстро разбегается вокруг.

Не столько энергичное, сколько мощное явление

Во втором определении взрыва есть неточность. Слова «процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме» не совсем корректны. Взрывчатые вещества не являются особо энергичными. Удельная энергия, освобождающаяся при взрыве тротила, – около $4,2 \cdot 10^6$ джоулей, что соответствует энергии горения дров (самых плохих – осиновых) или энергии, получаемой организмом при усвоении 500 граммов белого хлеба. Энергия сгорания керосина или бензина (или энергия при усвоении организмом хорошего сала) в 10 раз больше.

У взрывчатых веществ большая не удельная энергия, а выделяющаяся удельная мощность – из-за малого времени превращения энергии. Для одного килограмма тротила это время порядка нескольких миллисекунд, тем самым, мощность взрыва составляет пример-

но 10^9 ватт, или 1 гигаватт. А это – мощность крупной электростанции.

Итак, взрыв – явление не столько энергичное, сколько мощное. Это есть следствие внезапности взрыва – самой существенной стороны взрывных процессов. Откуда же берется эта большая мощность или внезапность, почему превращение энергии совершается столь быстро? Ответов на этот вопрос столько же, сколько существует разновидностей взрывных процессов. Только перечислить их потребуются не одна страница текста. Конечно, их можно как-то сгруппировать, выделить существенные черты каждой группы. Я оставляю в стороне сложные для краткого популярного объяснения случаи микровзрывов внутри структуры твердых тел и макровзрывы космического масштаба.

Основные виды исходной энергии взрывов

1) *Химическая энергия твердых или жидких взрывчатых веществ, взрывоопасных газовых или пылевоздушных смесей.* Это самые распространенные случаи взрывов. Сущность превращения энергии при этом – это переход части электрической энергии связи электронов молекулярных орбиталей в кинетическую энергию отталкивания продуктов реакции, энергия связи в молекулах которых больше по величине, чем у исходного вещества. При этом «работают», т.е. дают кинетическую энергию и, следовательно, более высокую температуру, электрические силы отталкивания наружных электронных орбиталей продуктов.

Точно таков же механизм реакции и при горении. Обычное пламя передается от одного участка газа к другому за счет процессов теплопроводности и диффузии. Важную роль при этом играет диффузионный перенос активных центров реакции – молекул, у которых векторная сумма собственных вращательных характеристик (спинов) наружных электронов не равна нулю. О таких молекулах говорят, как о частицах с ненасыщенным спином. Они очень активны химически, поскольку ненасыщенный спин жаждет найти себе частицу с противоположно направленным спином. За их химическую активность эти частицы называют радикалами (в политике радикал – активный политик, действующий не по стандарту). Свободные радикалы начинают и поддерживают химическую реакцию. Быстрый перенос активных центров создает цепной (лавинный) процесс вовлечения новых частиц в реакцию и, следовательно, повышения температуры.

Процесс горения в определенных условиях может перейти во взрыв. Объяснить этот переход только явлениями переноса уже невозможно, поскольку химическое превращение при взрыве, которое называют детонацией, требует понимания законов газовой динамики. И, в частности, знания особого типа движения вещества – ударной волны.

2) *Ядерная энергия.* Основное ее отличие от химической – в величине удельной энергии. Один килограмм ядерного превращения урана при КПД 50% дает в 10^7 раз больше энергии, чем килограмм химического вещества, а килограмм дейтерида лития при термоядерном взрыве («водородная бомба») – в 10^8 раз

больше. Такая концентрация энергии делает ядерные взрывы привлекательными не только для военных целей, но и в мирном строительстве плотин или при добыче полезных ископаемых. Распространенное предубеждение против опасных радиоактивных последствий «мирных» подземных ядерных взрывов основано на незнании вопроса. При взрыве в толще массива радиоактивные продукты остаются надежно захороненными в очаге взрыва в виде остеклованного вещества, практически нерастворимого в воде. Именно такова схема современной утилизации отходов ядерной энергетики – спекание до остекловывания и подземное захоронение.

Природа энергетических превращений в ядерных взрывах также заключается в превращении части потенциальной энергии связи нуклонов в атомных ядрах в кинетическую энергию продуктов реакции. В случае уранового или плутониевого взрыва «работают» электрические силы отталкивания между положительно заряженными ядрами – продуктами деления исходного ядра на две части. Начальные расстояния действия этих сил имеют ядерный масштаб, а он в 10^5 раз меньше расстояний атомного (молекулярного) масштаба. Да и к тому же доля превращения потенциальной энергии в кинетическую при делении ядра значительно больше, чем при разрушении молекулярного комплекса. Что же касается сильных короткодействующих взаимодействий, которые собственно и называются ядерными силами, то они, являясь силами притяжения, только мешают процессу деления в его начальной стадии и делают процесс самопроизвольного деления крайне маловероятным. Процесс деления начинается, когда ядро урана-235 или плутония захватывает нейтрон и становится сильно неустойчивым. В капельной модели ядра оно меняет форму – вместо шара становится вытянутым эллипсоидом, в котором сильно уменьшается роль ядерных сил притяжения, поскольку размер эллипсоида превышает критический порог действия ядерных сил ($2 \cdot 10^{-15}$ м). Вот тут-то и срабатывают электрические силы отталкивания протонов, разрывающие ядро на две части. Быстрота ядерного превращения урана в бомбе также имеет своей причиной разветвленную цепную реакцию, где роль активных центров играют нейтроны, «размножающиеся» в каждом акте деления. Кинетика этого процесса описывается таким же уравнением, что и кинетика цепных химических реакций. Процесс также может развиваться стационарно (ядерные реакторы) или экспоненциально (ядерная бомба).

Механизм превращения энергии при термоядерном («водородном») взрыве другой. Суть ядерных реакций при этом – образование гелия при слиянии ядер водорода (точнее, его изотопов – дейтерия и трития). Кинетическая энергия образовавшегося гелия и нейтронов высока за счет работы, совершаемой при слиянии (синтезе) силами притяжения. А это могут быть лишь ядерные силы – ведь электрические силы отталкивания только мешают водородным ядрам соединяться. Для преодоления отталкивания обязательно нужен начальный запас кинетической энергии, т.е. вещество

должно быть очень сильно разогрето – до десятков и сотен миллионов градусов. При слиянии ядер включаются ядерные силы, притягивающее действие которых значительно сильнее электрического отталкивания. И израсходованный запас необходимой начальной кинетической энергии восстанавливается с лихвой – температура возрастает до миллиардов градусов. Это и происходит внутри нашего родного Солнца (как и всех других звезд).

В действующих конструкциях водородных бомб (вернее, к счастью – бездействующих) предусматривается несколько реакций синтеза, дающих общую выделяющуюся энергию на порядок большую, чем в реакциях ядерного деления. К сожалению, пока процесс ядерного синтеза умеют осуществлять только в лавинном, экспоненциальном, взрывном варианте. Осуществление стационарного ядерного процесса – мечта, но все же, по-видимому, осуществимая.

Отмечу, что мощность ядерных (а тем более – термоядерных) взрывов составляет фантастические для человеческого воображения величины. Так взрыв хиросимской бомбы имел мощность 10^{22} ватт. Для сравнения – мощность всех электростанций Земли не превышает 10^{14} ватт.

При ядерных взрывах, кроме обычных поражающих факторов (разрушение всего вблизи, действие ударной волны вдали), есть и добавочные факторы – воздействие сильного теплового, рентгеновского и гамма-излучения, а также радиоактивность продуктов взрыва и ставшей радиоактивной почвы, распространяющейся с пылевым облаком («грибом») на большие расстояния от взрыва.

3) *Электрическая энергия.* Это самые древние известные людям взрывы – грозовые явления. Молния очень быстра. За доли секунды образуется длинный изломанный канал, представляющий собой плазму, имеющую высокие температуру и давление. Эта плазма, расширяясь, образует в окружающем воздухе ударную волну, которая, распространяясь и ослабевая, превращается в сильную акустическую волну. Мы воспринимаем ее как гром.

Вблизи молнии можно ощутить, кроме ее теплового излучения, действие ударной волны. Взрыв молнии напоминает взрыв длинного шнура из взрывчатого вещества (так называемый детонационный шнур для инициирования взрывных зарядов с большого расстояния).

Помимо взрывного воздействия, разряд молнии может нанести и поражение электрическим током. В лабораторных условиях электрический взрыв осуществляется пропусканием сильного тока по тонкой металлической проволоке.

4) *Кинетическая энергия быстро двигающихся тел.* Эта энергия после ряда превращений выделяется в виде кинетической энергии препятствия или воздуха. Такова природа взрывов, происходящих при падении метеоритов. При малых углах наклона к горизонту взрыв может произойти в воздухе с образованием сильной ударной волны. Так случилось, например, при падении в 1907 году Тунгусского метеорита, когда

выделилась энергия, эквивалентная энергии взрыва 10 мегатонн тротила. При больших углах наклона путь метеорита в атмосфере значительно короче, и кинетическая энергия превращается в тепловую уже в толще земли. Это – аналог подземного взрыва с образованием взрывной воронки (метеоритного кратера). Такое бывало на Земле – геологи насчитывают несколько огромных кратеров, сейчас уже заполненных осадочными породами. На Луне, где атмосферы нет, каждый метеорит образует воронку взрыва – лунный лик испещрен метеоритными кратерами.

5) *Потенциальная энергия упругих деформаций в земной коре.* Огромный массив породы может быть сжат окружающей средой и иметь сильные упругие деформации (сжатия или сдвига). Иногда достаточно небольшой подвижки пород, чтобы энергия упругой деформации перешла в кинетическую энергию среды (по аналогии с разжимающейся пружиной). Это и есть внутренний механизм землетрясений, которые представляют собой волновое последствие первоначальной разгрузки деформации, носившей внезапный, взрывной характер.

6) *Внутренняя энергия сжатых газов.* Если стенки сосуда, содержащего сжатый газ, внезапно разрушаются, то внутренняя энергия, согласно первому началу термодинамики, будет «работать» над окружающей средой, прежде всего расширяя ее и образуя ударную волну. Это – взрывы баллонов со сжатым газом (часто сопровождающиеся воспламенением газа, если он горючий), взрывы паровых котлов при нарушении правил их эксплуатации. В природе это – вулканические взрывы. Например, взрыв острова Санторин в XV веке до н.э. – возможный прообраз гибели Атлантиды. В 1883 году при грандиозном взрыве вулкана Кракатау по всей атмосфере распространилось облако поднятой взрывом вулканической пыли. Классическое объяснение такого взрыва устами своего героя инженера Сайруса Смита сделал Жюль Верн в романе «Таинственный остров».

Что же общего имеют все шесть рассмотренных случаев взрывного превращения? Прежде всего, это внезапный переход запасенной потенциальной энергии (или даже кинетической – для метеоритов) в главный взрывной эффект – кинетическую энергию движения продуктов взрыва и окружающей среды, что сопровождается разлетом осколков взрывного устройства и окружающих предметов и образованием взрывной ударной волны (об этом будет рассказано позже).

В заключение этой статьи я остановлюсь на применении мощных (с большой энергией) взрывов в мирных целях.

Крупные взрывы в нашей стране

Наша страна (Россия, СССР) всегда была передовой и по объему использования крупных взрывов (в том числе и ядерных), и по научному обоснованию этого использования. Так сложилось развитие науки, что еще в довоенные годы появился раздел технической физики – «физика взрыва». В этой научно-техни-

ческой области сформировались такие ученые, как будущие академики Ю.Б.Харитон, Я.Б.Зельдович, К.И.Щелкин, М.А.Садовский, будущие генералы Г.И.Покровский, Б.А.Олисов. Неслучайно почти все они впоследствии возглавили работы по атомному проекту СССР, которые были связаны непосредственно с взрывными ядерными устройствами и с действием взрыва. И.В.Курчатов – мозг и сердце атомного проекта, не будучи сам специалистом в этой области, доверял им.

Я здесь не упоминаю многих других ученых, вложивших в этот проект неоценимый вклад, в частности – создателя и душу журнала «Квант» академика И.К.Кикоина, занимавшегося в атомном проекте задачей разделения изотопов.

В использовании мощных взрывов в мирных целях особенно велика роль академика М.А.Садовского, возглавлявшего в 1960–1992 годы спецсектор, а потом и весь Институт физики Земли АН СССР, генерала Г.И.Покровского и директора треста «Союзвзрывпром» М.М.Докучаева.

В 1936 году на Урале на Коркинском угольном месторождении было одновременно взорвано 1808 тонн взрывчатого вещества – образовалась большая траншея для добычи угля открытым способом. В послевоенные годы усилилось внимание к применению мощных взрывов в строительном деле – для создания плотин, в горнодобывающей промышленности – для создания подземных полостей и вскрытия месторождений полезных ископаемых.

В 1966–67 годах с помощью серии направленных взрывов взрывчатого вещества общей массой 5300 тонн была создана плотина на реке Малая Алмаатинка в урочище Медео под Алма-Атой. Плотина надежно защитила тогдашнюю столицу Казахстана от опасности селевых потоков.

В 1968 году несколько взрывов с общей массой взрывчатки 2000 тонн обрушили берега реки Вахш в Таджикистане. Была создана плотина высотой 40 метров. Воды искусственного водохранилища с тех пор направляются по туннелям на орошение и промышленные нужды долининой местности. При обосновании этой работы и разработке проекта взрыва был учтен отрицательный опыт США, где в 1929 году аналогичная идея закончилась провалом – надежную плотину создать не удалось.

Успешность крупных взрывов в СССР была основана на создании теории действия взрыва на горные породы, который должен приводить к их направленному выбросу. Эта теория была создана после серии экспериментов, проведенных в Институте химической физики АН СССР в 1955–1960 годы под общим руководством академика М.А.Садовского. Эксперименты проводились в лаборатории с зарядами порядка одного грамма, на полигонах – от одного до тысячи килограммов. В 1957 году под Ташкентом в одних и тех же грунтовых условиях была проведена серия взрывов на выброс с массой заряда от одной до тысячи тонн. Пожалуй, при современном отношении к фундаментальным научным исследованиям на такую работу

денег никто бы не выделил (в современных ценах эта работа стоила бы свыше ста миллионов рублей).

В начале статьи я рассказал о заключительном, тысячетонном взрыве этой серии экспериментов. Крайтер взрыва (взрывная воронка) существует и сейчас. Он представляет собой единственное в этой безводной местности озеро диаметром 200 метров и успешно используется для сельскохозяйственных нужд. Но взрыв проводился, конечно, не для этого, а с целью получения экспериментальных данных о разлете грунта при таких мощных взрывах. Соответствующая теория, учитывающая влияние силы тяготения на движение вещества при подземном взрыве, в то время еще только создавалась, и этот мощный взрыв позволил получить надежные расчетные формулы и осуществить успешное проектирование крупных подземных взрывов, некоторые из которых я охарактеризовал.

Автор статьи принимал участие в этом эксперименте в качестве начальника отряда кинематографических наблюдений. Было задействовано несколько десятков аппаратов для киносъемок с частотой от одного до тысячи кадров в секунду. В статье приводится серия фотографий этого взрыва в различных стадиях его развития.

Для того чтобы узнать, где окажутся породы, непосредственно прилегающие к заряду, в заряд были введены «меченые атомы» – быстро распадающиеся изотопы. Они оказались надежно погребенными глубоко под дном нынешнего озера. Ведь если бы заряд был ядерным, эти породы были бы опасно радиоактивными. «Меченые атомы» показали возможность использования для подобных целей и ядерных взрывов – куски радиоактивной породы при этом не разлетаются, а остаются погребенными.

В заключение упомяну, что в мирных целях широко использовались и ядерные взрывы (и не только в нашей стране) – вплоть до запрещения в 1996 году проводить любые ядерные взрывы, в том числе и подземные. Обычно это не афишировалось, поскольку было связано и с оборонными задачами – испытанием новых конструкций бомб. Но поскольку скрыть эти взрывы все равно было невозможно из-за их сейсмического действия, сегодня в открытой печати можно найти все сведения о времени, месте и цели их проведения. За период с 1965 по 1988 год в нашей стране (СССР) было осуществлено 116 подземных ядерных взрывов в мирных целях. Из них 39 было проведено в научных целях – для исследования земных недр с помощью возникающих при взрыве мощных сейсмических волн.

Готовя к печати эту статью, я был рад возможности еще раз вспомнить моих друзей – начальника экспедиции В.Н.Родионова, начальника отряда сейсмических наблюдений А.Н.Ромашова и многих других. И еще раз ощутить благодарность всем моим учителям, и прежде всего – «главному взрывнику» страны академику М.А.Садовскому, нашему незабвенному «Михалу», как его с любовью называли и мы, его ученики, и все ученые, занимавшиеся изучением взрыва.

(Продолжение следует)

Полуправильные многоугольники на решетках

В. ВАВИЛОВ, А. УСТИНОВ

ОДНИМ ИЗ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ, КОТОРЫЙ ВОЗНИКАЕТ в различных задачах алгебры, теории чисел и анализа, является ортогональная *целочисленная решетка* $\mathbb{Z}^2$. Она состоит из всех точек плоскости Oxy , у которых обе координаты – целые числа. Точки решетки можно рассматривать как узлы клетчатой бумаги, размер клеточки которой равен единице.

Если все вершины многоугольника лежат в узлах решетки $\mathbb{Z}^2$, то говорят, что он *расположен* на этой решетке.

О том, что ни один правильный многоугольник, за исключением квадрата, нельзя расположить на клетчатой бумаге так, что все его вершины являются ее узлами (т.е. имеют целые координаты), уже рассказывалось в журнале «Квант»¹ (см. также задачу 3 из Упражнений).

В данной статье изучается аналогичный вопрос о так называемых *полуправильных* многоугольниках – равноугольных и равносторонних. *Равноугольным (равносторонним)* многоугольником называется многоугольник, у которого внутренние углы (все стороны) равны, но стороны (внутренние углы) могут и отличаться друг от друга; пересечение этих множеств составляет множество правильных многоугольников. Подчеркнем, что в этих определениях ничего не говорится о выпуклости многоугольников. Примерами равноугольных многоугольников, расположенных на решетке, служат квадрат и восьмиугольник (рис. 1). Частными случаями равносторонних являются многоугольники, ограниченные замкнутыми ломаными с единичными длинами звеньев и прямыми углами между звеньями.

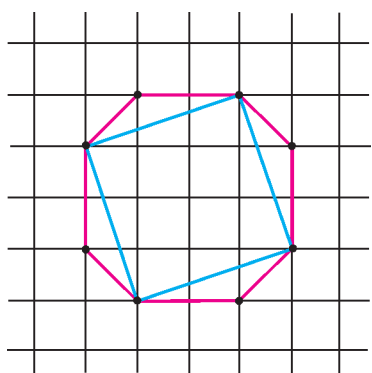


Рис. 1

Расположенных на решетке, служат квадрат и восьмиугольник (рис. 1). Частными случаями равносторонних являются многоугольники, ограниченные замкнутыми ломаными с единичными длинами звеньев и прямыми углами между звеньями.

¹ Егоров А. «Решетки и правильные многоугольники» («Квант» №12 за 1974 г.).

Правильный треугольник

Прежде чем решать задачу о полуправильных многоугольниках на решетке, рассмотрим более простой вопрос: можно ли расположить на целочисленной решетке $\mathbb{Z}^2$ правильный треугольник?

Отрицательный ответ на этот вопрос, по-видимому, впервые был дан Е. Лукасом в 1878 году. Мы приведем два доказательства этого важного результата. В основе первого (принадлежащего Лукасу) лежат элементарные сведения из теории делимости чисел. Второе доказательство будет основано на иррациональности чисел вида $\operatorname{tg} \frac{2\pi}{n}$.

Теорема 1. *Правильный треугольник нельзя расположить на целочисленной решетке $\mathbb{Z}^2$.*

Доказательство I. Предположим, что существуют правильные треугольники, которые можно расположить на решетке $\mathbb{Z}^2$.

Будем считать, что среди таких треугольников мы выбрали наименьший и что начало координат находится в одной из его вершин, а две другие вершины имеют координаты (a, b) и (c, d) . Тогда четыре целых числа a, b, c, d не имеют общих делителей, отличных от ± 1 (взаимно просты). В противном случае можно перейти к треугольнику меньшего размера $(0, 0), (a/k, b/k), (c/k, d/k)$, где k – общий делитель всех четырех чисел (рис. 2).

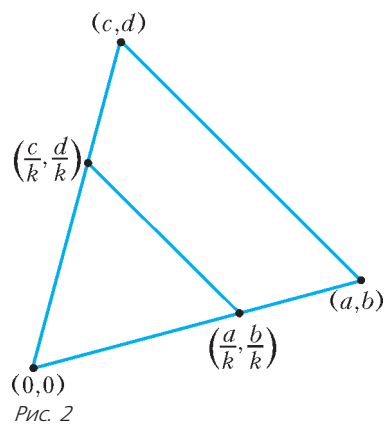


Рис. 2

Запишем равенство сторон треугольника в координатах:

$$a^2 + b^2 = c^2 + d^2 = (a - c)^2 + (b - d)^2.$$

Отсюда заключаем, что

$$a^2 + b^2 = c^2 + d^2 = 2(ac + bd).$$

Следовательно,

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 4(ac + bd),$$

т.е. сумма квадратов четырех чисел делится на 4.

Квадраты целых чисел при делении на 4 дают остатки только 0 или 1. Поэтому или все четыре числа a, b, c, d четные, или все – нечетные. Первое невозможно потому, что эти числа, по нашему выбору, взаимно просты. Второе же невозможно потому, что тогда не выполняется соотношение

$$a^2 + b^2 = (a - c)^2 + (b - d)^2,$$

ибо его левая часть не делится на 4, а правая – делится.

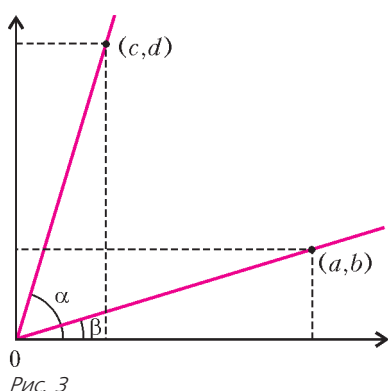


Рис. 3

Полученное противоречие и доказывает теорему.

Доказательство II.

Отметим, что если два луча с началами в начале координат проходят через узлы (a, b) и (c, d) решетки $\mathbb{Z}^2$ (рис.3), то тангенс угла θ между этими лучами является числом рациональным или не оп-

ределен, так как

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta} = \frac{\frac{d}{c} - \frac{b}{a}}{1 + \frac{bd}{ac}} = \frac{ad - bc}{ac + bd}.$$

Значит, если предположить, что существует равносторонний треугольник с вершинами в узлах решетки $\mathbb{Z}^2$, то два луча с началами в одной из его вершин и содержащие стороны треугольника, образуют угол в 60° . Но $\operatorname{tg} 60^\circ = \sqrt{3}$ – иррациональное число, и, следовательно, расположить на решетке $\mathbb{Z}^2$ равносторонний треугольник нельзя.

Равносторонние многоугольники

Теорема 2. (Д.Болл.) а) На целочисленной решетке $\mathbb{Z}^2$ нельзя расположить ни одного равностороннего многоугольника с нечетным числом сторон.

б) На решетке $\mathbb{Z}^2$ можно расположить равносторонний многоугольник с любым четным числом сторон.

Доказательство. а) Предположим противное, т.е. что равносторонний многоугольник с нечетным числом сторон n можно расположить на решетке $\mathbb{Z}^2$. Будем считать, что этот многоугольник имеет наименьшую возможную длины стороны. Пусть $\vec{v}_k = x_k \vec{i} + y_k \vec{j}$ ($k = 1, 2, \dots, n$) – векторы, направленные вдоль сторон многоугольника. Их сумма равна нулю и они имеют равные длины, значит,

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = 0,$$

$$y_1 + y_2 + \dots + y_n = 0,$$

$$x_1^2 + y_1^2 = x_2^2 + y_2^2 = \dots = x_n^2 + y_n^2 = a^2,$$

где через a обозначена длина стороны многоугольника.

Возводя каждое из первых двух равенств в квадрат, а затем складывая полученные результаты (с учетом последующих n равенств), получаем соотношение

$$na^2 = -2 \sum_{i \neq j} (x_i x_j + y_i y_j).$$

Так как a^2 – натуральное число (почему?) и n нечетно, то a^2 – четно.

Если a^2 делится на 4, то тогда все x_i и y_i являются четными числами, поскольку попарная сумма их квадратов делится на 4. Но этого быть не может, так как из векторов $\vec{v}_i/2$, которые в этом случае также имеют целочисленные координаты, можно составить равносторонний n -угольник (почему?). Он имеет сторону вдвое меньшую, чем исходный, а это невозможно.

Пусть теперь a^2 делится на 2, но не делится на 4. Но тогда все x_i и y_i – нечетные числа, так как все они удовлетворяют уравнению $x_i^2 + y_i^2 = a^2$. Таким образом, сумма

$$\sum_{i \neq j} (x_i x_j + y_i y_j)$$

является четным числом, и поэтому a^2 делится на 4, что, как мы уже знаем, невозможно.

б) Пристраивая к равностороннему шестиугольнику квадраты и шестиугольники (один шаг этого процесса показан на рисунке 4), убеждаемся,

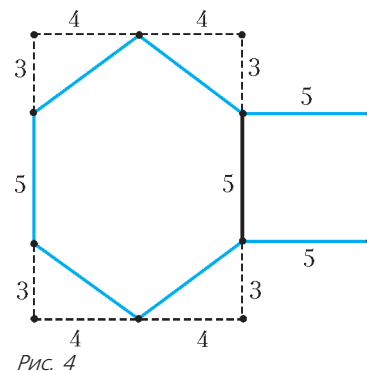


Рис. 4

что вторая часть теоремы 2 действительно имеет место. Правда, при этом получаются невыпуклые равносторонние многоугольники с четным числом сторон. Однако предъявить выпуклый многоугольник также возможно (см. задачу 2 из Упражнений).

Равноугольные многоугольники

Для изучения класса равноугольных многоугольников нам понадобится следующее утверждение:

Числа $\operatorname{tg}(2\pi/n)$ при натуральных значениях n всегда являются иррациональными, за исключением случаев $n = 1, 2, 4, 8$.

Для его доказательства мы применим формулу

$$\operatorname{tg} n\alpha =$$

$$= \frac{C_n^1 \operatorname{tg} \alpha - C_n^3 \operatorname{tg}^3 \alpha + C_n^5 \operatorname{tg}^5 \alpha - \dots + (-1)^{(n-1)/2} \operatorname{tg}^n \alpha}{1 - C_n^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + C_n^4 \operatorname{tg}^4 \alpha - \dots + (-1)^{(n-1)/2} \operatorname{tg}^{n-1} \alpha}, \quad (1)$$

где C_n^k – коэффициенты из формулы бинома Ньютона

$$(a+b)^n = C_n^0 a^n b^0 + C_n^1 a^{n-1} b^1 + \dots + C_n^n a^0 b^n.$$

Доказательство формулы (1) легко получить методом

математической индукции, и мы предлагаем сделать это читателю самостоятельно.

Будем считать, что $n \geq 5$ и $n \neq 8$, так как случаи $n = 1, 2, 3, 4, 8$ ясны. Пусть $\alpha = 2\pi/n$. Тогда $\operatorname{tg} n\alpha = 0$ и по формуле (1) число $x = \operatorname{tg}(2\pi/n)$ является корнем уравнения с целыми коэффициентами

$$n - C_n^3 x^2 + C_n^5 x^4 - \dots + (-1)^{(n-1)/2} x^{n-1} = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении старший коэффициент равен ± 1 , следовательно, в множестве рациональных чисел оно может иметь только целые корни.² Поэтому если x – рациональное число, то оно может быть только целым.

Рассмотрим два случая: а) $n = mp$, где p – нечетное простое число; б) $n = 2^k$ и $k \geq 4$. Этими случаями исчерпываются все возможности.

а) Если $m = 1$, т.е. $n = p$, то из равенства (2) вытекает, что x^2 делит p и, следовательно, $x = \operatorname{tg}(2\pi/n) = \pm 1$. Но это невозможно для нечетного простого n .

Пусть теперь $n = mp$, где $m > 1$. Если число $\operatorname{tg}(2\pi/n)$ рационально, то, как видно из формулы (1), число $\operatorname{tg}(2\pi m/n) = \operatorname{tg}(2\pi/p)$ также было бы рационально, а этого, по доказанному выше, быть не может.

б) Пусть теперь $n = 2^k$ и $k \geq 4$. Так как $\operatorname{tg}(2\pi/16) = \sqrt{2} - 1$ – число иррациональное, то по формуле (1) все числа вида $\operatorname{tg}(2\pi/2^k)$ ($k \geq 4$) также иррациональны.

Утверждение доказано.

Теорема 3. (Д. Болл.) *Из всех возможных равноугольных многоугольников на решетке $\mathbb{Z}^2$ можно расположить только прямоугольник и восьмиугольник.*

Доказательство. Будем считать, что $n \geq 4$, так как случай правильного треугольника уже рассматривался ранее. Тот факт, что квадрат и равноугольный восьмиугольник можно расположить на решетке, виден из рисунка 1. Пусть теперь $n > 4$ и равноугольный n -угольник можно разместить на решетке $\mathbb{Z}^2$. Тогда векторы, которые формируют его стороны, имеют целочисленные координаты (рис.5) и угол между любыми двумя соседними векторами равен $2\pi/n$.

² Напомним, что если уравнение с целыми коэффициентами имеет рациональный корень p/q , то знаменатель q обязан делить старший коэффициент этого уравнения, а числитель p – свободный коэффициент.

Будем считать точку O началом координат; тогда угол между лучами $[OP)$ и $[OQ)$ равен $2\pi/n$, и $\operatorname{tg}(2\pi/n)$, как мы видели выше (указанные лучи проходят через узлы решетки),

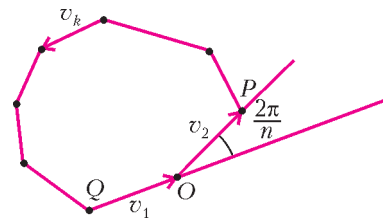


Рис. 5

должен быть при $n > 4$ рациональным числом. А это, как установлено ранее, возможно только в том случае, когда $n = 8$.

Упражнения

1. На клетчатой бумаге проведена замкнутая ломаная с вершинами в узлах сетки, все звенья которой равны. Докажите, что число звеньев такой ломаной четно.

2. Докажите, что на решетке $\mathbb{Z}^2$ можно расположить выпуклый равносторонний многоугольник с любым четным числом сторон.

3. Докажите, что единственным правильным многоугольником на плоскости, все вершины которого имеют рациональные координаты, является квадрат.

4. Докажите равенство (1) с помощью формулы Муавра $\cos n\alpha + i \sin n\alpha = (\cos \alpha + i \sin \alpha)^n$.

5. а) Докажите, что если p и q – взаимно простые натуральные числа и $\cos(p\pi/q)$ – рациональное число, то число $\cos(\pi/q)$ также рационально.

б) Докажите, что число $\cos(p\pi/q)$ при взаимно простых p и q , $q > 3$, рационально тогда и только тогда, когда рационально число $\cos(\pi/q)$.

в) Пусть p и q взаимно просты, $q \geq 3$. Докажите, что числа $\sin(p\pi/q)$ иррациональны при $q \neq 6$.

Указание. Используйте то, что $2 \cos n\alpha$ можно записать в виде $f_n(2 \cos \alpha)$, где $f_n(x)$ – многочлен с целыми коэффициентами и старшим коэффициентом, равным 1.

6. Докажите, что на каждой из правильных плоских мозаик, т.е. покрытии плоскости при помощи правильных многоугольников (но, быть может, разных типов), можно расположить только такие правильные многоугольники, которые «видны невооруженным глазом». Мы здесь ограничиваемся только такой качественной характеристикой.

Примечание. Заметим, что различных таких мозаик (паркетов) ровно 11 и в таких покрытиях плоскости встречаются правильные треугольники, квадраты, шестиугольники, восьмиугольники и двенадцатиугольники.³

³ Колмогоров А. «Паркеты из правильных многоугольников» («Квант» №8 за 1986 г.).

КВАНТ + DVD

Мы рады сообщить нашим читателям, что вышел в свет электронный архив журнала «Квант» с 1970 по 2006 год.

Материалы, опубликованные в журнале «Квант» за многие годы его существования, бесценны. И это не пустые слова. Не одно поколение «прошедших» через «Квант» молодых людей, как из числа занявших сегодня достойное место в мировой науке, так и пополнивших лучшие ряды сегодняшнего учительства, с благодарностью вспоминают журнал «Квант», который в их жизни сыграл роль путеводной звезды, определил выбор в пользу фундаментальных знаний.

Диск можно приобрести в редакции журнала «Квант».

Наши координаты – на последней странице журнала.

Пишите, звоните. Мы вас ждем.

Не деньги

А. ВАСИЛЬЕВ

В ПЕРВОМ НОМЕРЕ «КВАНТА» ОТ 1998 ГОДА БЫЛА заявлена новая рубрика «Физики на монетах мира», где было обещано в увлекательной форме рассказывать о выдающихся ученых всех времен и народов, появившихся на платежных средствах различных государств. Не обсуждая здесь «увлекательность формы», о которой судить может только читатель, отметим, что за прошедшие годы на страницах журнала появилось несколько десятков статей, иллюстрированных портретами физиков и математиков на красочных банкнотах и монетах многих стран. В этом плане неожиданным может показаться заголовок данной статьи, посвященной ученым на «не деньгах».

Собственно, не деньги, или по-немецки нотгельды (Notgeld), — это суррогатные платежные знаки, выпущенные в оборот различными банками и муниципалитетами, а также неправительственными организациями Германии и Австрии в период с 1914 по 1924 год. В ходе первой мировой войны и по ее завершении в этих странах проявилась острая нехватка наличных денег и, в первую очередь, разменной монеты. Серебро, а вслед за ним медь и никель, быстро исчезли из оборота. Чтобы как-то справиться с этой проблемой, банки позволили городам вместо общей разменной монеты выпускать свои суррогаты. Со временем нотгельды стали выпускаться не только в бумажном виде, но и из алюминия, цинка, кожи, ткани, дерева и других материалов, и не только муниципалитетами, но и различными фирмами, в том числе ресторанами и магазинами.

Инфляция, поразившая Германию в 1923 году, породила новый вид нотгельдов с номиналами в миллионы и миллиарды марок. Однако выпуск мелких номиналов не прекратился, но теперь это были выпуски, предназначенные исключительно для коллекционеров.

Во многих городах нотгельды иллюстрировали местные достопримечательности и представляли именитых сограждан. Так, на них появились знаменитые физики, математики и ученые других специальностей. О некоторых ученых, кому посвящены и «настоящие» монеты (Эрнст Аббе, Отто фон Герике), мы уже рассказывали, другие выдающиеся ученые — такие как Атанасиус Кирхер, Христиан Вольф, Иоганн Шретер, Адольф Андерсен — появились только на нотгельдах.

Атанасиус Кирхер (1602–1680) многими сравнивался с Леонардо да Винчи, а некоторые называли его последним представителем эпохи Возрождения. Он обладал поистине энциклопедическими познаниями и внес вклад практически во все области современного ему естествознания. Кирхер был одним из первых исследователей египетских иероглифов, он наблюдал колонии микробов в микроскопе и предложил эффек-

тивные методы борьбы с распространением эпидемий, изучал такие формы взаимного притяжения, как любовь, гравитация и магнетизм. Современными исследователями многие достижения Атанасиуса Кирхера поставлены под сомнение, они отмечают его эклектику и непрофессионализм, однако ясно, что уже одно присутствие в европейской науке универсального гения Кирхера способствовало ее быстрому прогрессу во всех областях.

Христиан Вольф (1679–1754) был ведущим представителем немецкой философской школы в период от Лейбница до Канта. Так же, как и Атанасиус Кирхер, он интересовался большинством направлений современного ему естествознания. В своем подходе он опирался прежде всего на математику, став основателем таких научных дисциплин, как экономика и деловое администрирование. Собственно, философию Вольф определял как науку возможного и подразделял ее на теоретическую и практическую части. Основой обеих являлась логика, иногда называемая рациональной философией. Теоретическая философия у Вольфа подразделялась, в свою очередь, на космологию и рациональную психологию. Обе известны в основном благодаря «Критике чистого разума» Иммануила Канта. Наконец, практическая философия подразделялась у Вольфа на этику, экономику и политику. Моральным принципом его философии стала мысль о необходимости стремления человека и общества к совершенству. В этом, в частности, особенно проявлялся его математический склад ума.

Иоганн Шретер (1745–1816), юрист по образованию, достиг высокого положения при королевском дворе в Ганновере, однако променял свою политическую карьеру на наблюдательную астрономию. После открытия Уильямом Гершелем планеты Уран (1781 г.) Шретер приобрел у него подзорную трубу с фокусным расстоянием 122 см и апертурой 12 см. С этим инструментом он быстро завоевал хорошую репутацию в астрономической среде за счет систематических наблюдений Луны, Солнца и Венеры. Тремя годами позже у того же Гершеля за свою полугодовую зарплату он купил подзорную трубу с фокусным расстоянием 214 см и апертурой 16,5 см. С этой передовой по тому времени аппаратурой он достиг увеличения изображения удаленных объектов в 1200 раз. После этого Шретер занялся систематическими наблюдениями Марса, Юпитера и Сатурна. Им были выполнены важные исследования по топографии Луны и Марса, его име-

(Продолжение см. на с. 23)