



ЯКОВ БОРИСОВИЧ  
ЗЕЛЬДОВИЧ



PERSONALIA

92:53

**ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ**  
**(К пятидесятилетию со дня рождения)**

8 марта 1964 г. исполнилось 50 лет акад. Якову Борисовичу Зельдовичу, продолжающему с поистине юношеской страстью распространять свою творческую энергию на все новые области теоретической и экспериментальной физики. Замечательное свойство Я. Б. Зельдовича заключается в том, что он не бросает своих научных увлечений и по сей день находит все более глубокие подходы к многочисленным проблемам, с которыми он сталкивался за свою научную жизнь. Первым по времени и доселе не исчерпанным полем его деятельности является химическая физика. Окончив школу-девятилетку с химическим уклоном (единственное учебное заведение, в котором он официально состоял), Яков Борисович поступил лаборантом в институт Механобр (по механической обработке и обогащению полезных ископаемых).

Во время экскурсии в Ленинградский физико-технический институт семнадцатилетний Зельдович так удивил своими вопросами заведующего лабораторией С. З. Рогинского (ныне чл.-корр. АН СССР), что он с помощью А. Ф. Иоффе организовал перевод талантливого юноши в Ленинградский Физико-технический институт. Вскоре происходит разделение Института и Яков Борисович оказывается лаборантом Института химической физики. Он участвует в экспериментальных работах лаборатории С. З. Рогинского. Первая печатная работа, в которой участвовал Я. Б. Зельдович, в соавторстве с С. З. Рогинским и Л. А. Сена, касалась экспериментального исследования загадочного явления «запоминания» кристаллической формы при повторной кристаллизации нитроглицерина. Конечно, не эта работа и не трудные измерения (совместно с С. Ю. Еловичем) кинетики каталитического окисления СО на  $\text{MnO}_2$  определили дальнейший путь ученого, но важно, что его теоретической деятельности предшествовало серьезное освоение эксперимента. Недаром среди многочисленных учеников Якова Борисовича, наряду с теоретиками, немало чистейших и первоклассных экспериментаторов. От изучения процессов гетерогенного катализа научные интересы молодого исследователя, естественно, переходят к их теоретической основе — теории адсорбции на неоднородной поверхности, в возрасте 20 лет он создает свою первую самостоятельную работу, посвященную теоретическому истолкованию изотермы адсорбции Фрейндлиха. Здесь уже ощущается мощь теоретика. Поставлена трудная математическая задача, над общими методами решения которой и поныне бьются специалисты: решение интегрального уравнения первого рода, т. е. нахождение спектра по интегральному эффекту. Я. Б. Зельдович простым приближенным методом дал полное решение для интересовавшего его случая. Эта работа, вместе с работами М. И. Темкина, шедшего несколько другим направлением, послужила началом целой области химической физики — теории адсорбции и катализа на неоднородных поверхностях, которой теперь посвящены обширные монографии. Сам автор в дальнейшем отошел от этих вопросов — случай, пожалуй, единственный в его научной деятельности. Следующим этапом явилось участие в обширной работе по идее и под общим руководством Н. Н. Семенова по окислению азота при горении. Здесь проявилась еще одна черта ученого — стремление к проблемам, важным для практики, и глубокий интерес к внедрению полученных результатов. Работы, о которых идет речь, связаны с крайне важной и сейчас практической задачей фиксации атмосферного азота. Они были опубликованы лишь много лет спустя отдельной монографией (совместно с П. Я. Садовниковым и Д. А. Франк-Каменецким). Я. Б. Зельдович вскоре стал руководителем обширного комплекса экспериментальных, теоретических и технических работ. Для технической и экономической стороны задачи был приглашен также опытный инженер-производственник Г. А. Барский, ставший одним из ближайших

учеников и многолетних сотрудников Я. Б. Зельдовича. В разработке этой проблемы Яков Борисович участвует и поныне: в только что вышедшем сборнике «Фиксация атмосферного азота» есть статьи его с сотрудниками.

Я. Б. Зельдович является одним из основателей важной отрасли химической физики — макроскопической кинетики, изучающей законы химического процесса в связи с физическими явлениями диффузии и теплопередачи, осложняющими его реальное протекание в природе и в технике. Ему принадлежит основной результат диффузионной кинетики пористых сред: скорость суммарного процесса на пористой поверхности оказывается средней геометрической из скорости реакции и скорости диффузии. Продолжая классические исследования Н. Н. Семенова и его школы, Я. Б. Зельдович внес особенно большой вклад в такой важный раздел макроскопической кинетики, каким является теория горения. Вместе с первым из своих многочисленных учеников (а ученики у него появились с тех пор, когда Якову Борисовичу было 20 лет) Д. А. Франк-Каменецким он нашел количественную связь между скоростью распространения пламени и кинетикой химических реакций в нем. Они впервые поняли, что задача о режиме стационарного распространения пламени представляет собой задачу на собственные значения. В дальнейшем Я. Б. Зельдович исчерпывающим образом исследовал эту задачу, четко выяснил необходимые приближения и идеализации, в частности важность предположения о нулевой скорости реакции в некоторой окрестности исходного состояния. Дальнейшие исследования не внесли в этот вопрос ничего принципиально нового. Развитие и углубление теории распространения пламени Яков Борисович продолжает и по сей день. Уже в 1962 г. его аспиранты А. Г. Истратов и В. Б. Либрович уточнили предложенный им приближенный метод расчета скорости пламени для неразветвленных цепных реакций и получили блестящее согласие с измерениями, которые провел на смесях хлора с водородом другой его ученик, А. И. Розловский. Я. Б. Зельдовичу принадлежат изящные математические решения таких основных задач теории горения, как поджигание накаливаемой поверхностью, пределы распространения пламени и ряд других. Уже сама постановка задачи о поджигании представляла значительные математические трудности, которые Яков Борисович преодолел остроумным образом, найдя инвариантность уравнений относительно некоторой группы преобразований. Вообще надо отметить, что исключительное внутреннее чутье неизменно подсказывает Якову Борисовичу адекватный задаче математический аппарат, который часто оказывается новым даже для специалистов математиков. Вокруг него создавалась обширная научная школа, ведущая теоретические и экспериментальные исследования процессов горения и выработавшая оригинальный плодотворный подход к ним.

В последние годы к этим работам был привлечен крупный механик Г. И. Баренблатт, в сотрудничестве с которым Яков Борисович успешно применил к задачам горения современные методы машинной математики. Развивая метод, предложенный английским исследователем Сполдингом, они рассчитали скорость распространения пламени в ряде сложных систем путем фактического рассмотрения выхода решения на стационарный режим и блестяще подтвердили таким образом выводы приближенной теории.

К этому же циклу относятся работы по устойчивости пламени. Удалось доказать устойчивость режима равномерного распространения, основываясь только на монотонности кривой распределения температур. Я. Б. Зельдовичу и его школе принадлежит как сама идея изучения высокотемпературной химической кинетики посредством измерения скорости пламени, так и ее успешное экспериментальное претворение.

В годы Великой Отечественной войны теория горения приобрела новое живое практическое значение. О размахе и характере научной и практической деятельности Якова Борисовича в эти годы можно составить представление по известной работе «О теории горения порохов и взрывчатых веществ», монографии (совместно с М. А. Ривиным и Д. А. Франк-Каменецким) «Импульс реактивной силы пороховых ракет», обширной работе об устойчивости режима горения пороха в полузамкнутом объеме.

Этими работами Яков Борисович создал физические основы внутренней баллистики ракетных пороховых двигателей. Важность этой науки в наше время не может быть переоценена. Исходя из того, что сгорание порохов происходит в газообразной фазе (подобно тому как, по А. Ф. Беляеву, происходит горение испаряющихся жидких взрывчатых веществ) после стадии относительно низкотемпературного разложения — газификации пороха, Я. Б. получил выражения для скорости горения пороха и ее зависимости от температуры и давления.

Принципиально новым явился анализ нестационарных режимов, понятие нестационарной скорости горения, введенное Я. Б., и выяснение пределов устойчивости стационарных режимов.

Теория нестационарных режимов дала возможность объяснить потухание пороха при падении давления, а также завышенную скорость горения в режиме поднимаю-

щегося давления. Из этой теории можно вывести усиление звука при отражении от горячей поверхности, приводящее к возникновению злокачественных колебаний в пороховых двигателях. Та же теория объяснила аномальное горение в тех же двигателях, при котором происходит срыв горения и затухание пороха.

Недавно появилась совместная с Р. М. Зайделем новая принципиальная работа Я. Б. по горению, где рассматривается горение не в режиме распространения пламени, а в индукционном режиме, когда смесь разогревается не за счет теплопроводности от пламени, а за счет местного разогрева от реакции. В первые годы после войны Я. Б. Зельдович организовал в Московском механическом институте кафедру процессов горения и читал на ней курс. Записи двух частей этого курса, обработанные Я. Б. совместно с В. В. Воеводским и Д. А. Франк-Каменецким и отлитографированные, пользуются до сих пор широкой популярностью как учебное пособие, хотя и стали библиографической редкостью.

Теория горения явилась для Якова Борисовича также и мостом к ряду новых научных направлений.

Так, естественным был переход от цепных реакций горения к ядерным цепным реакциям. И действительно, уже вскоре после открытия деления ядер в «Успехах физических наук» появился обзор Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона «Деление и цепной распад урана» — первое в мировой литературе обобщающее изложение этого круга вопросов, содержащее множество фундаментальных оригинальных результатов и сохранившее до сих пор свое значение как классический труд по научным основам ядерной энергетики.

Другой важной областью, к которой Яков Борисович пришел исходя из теории горения, явилась теория ударных волн и детонации.

Уже давно был известен детонационный режим горения, при котором реакция распространяется в газовой фазе со скоростью порядка 2 км/сек, а в конденсированной фазе — со скоростью 7—8 км/сек.

В начале XX в. Чепмен и независимо Жуге объяснили детонационный режим горения тем, что реакцию вызывает бегущая по веществу ударная волна, энергия которой в свою очередь пополняется за счет теплоты реакции. Но для объяснения определенной величины скорости детонации при данных условиях была привлечена дополнительная гипотеза, что скорость волны относительно продуктов детонации равна местному значению скорости звука в них. В течение сорока лет эта гипотеза не имела полного обоснования. Между тем занимавшиеся детонацией исследователи, не знакомые с газовой динамикой, в течение долгого времени необоснованно отвергали ударный механизм распространения детонации и разрабатывали свои, весьма фантастические гипотезы.

Порядок в этом вопросе навел только Я. Б., которому удалось очень просто обосновать гипотезу Чепмена — Жуге, исходя из общих соображений о непрерывности протекания реакции и ее энергетического баланса в веществе непосредственно за ударной волной. Независимо, но позже, к тому же обоснованию пришел один из крупнейших математиков нашего столетия Дж. Нейман.

Эти теоретические исследования были подкреплены и экспериментами. Совместно с Б. В. Айвазовым Я. Б. осуществил детонацию с повышенной скоростью распространения, перепуская волну из широкой трубки в узкую; волна в широкой трубке поджимала волну в узкой. Чтобы доказать повышение скорости, волну в узкой трубке заставляли сталкиваться со встречной детонационной волной, не поджимаемой сади, и наблюдали, как отклоняется фронт столкновения.

Теоретические и экспериментальные исследования детонации Я. Б. развернул очень широко. Он впервые объяснил явление пределов детонации, которое состоит в том, что уже при небольшом понижении скорости детонации вследствие тепловых или механических потерь волна перестает распространяться. Я. Б. объяснил это очень просто: сравнительно малое понижение температуры в детонационном фронте ведет к весьма существенному замедлению реакции, а это в свою очередь решающим образом увеличивает зону, где происходят потери.

Описанная теория относится к плоской детонационной волне. Фактически вблизи предела фронт бегущей волны искривляется — на нем образуется распространяющийся винтообразно излом. Повышение результирующей скорости ведет к возрастанию скорости поджигания смеси. Основы теории этого явления, так называемой спиновой детонации, тоже заложены Я. Б. Зельдовичем.

Изложить все работы по детонации, выполненные Я. Б., не представляется здесь возможным. Скажем только, что после его трудов учение о детонации стало неотъемлемой частью газовой динамики.

Помимо детонационных волн, Я. Б. много занимался и обычными ударными волнами в химически инертных веществах. Особый интерес представляет предложенная им простая теория распространения сходящихся сферических ударных волн. Для своего строгого решения эта задача требует сложных численных расчетов; исходя из простых физических предпосылок, Я. Б. разработал вполне удовлетворительную по точности аналитическую процедуру.

Другая интересная задача, впервые решенная Я. Б., — удар с большой скоростью по поверхности среды. Это одна из первых задач особого вида автомодельности. Любопытно, что при таком ударе получаемый средой импульс ударной волны может быть много больше импульса упавшего тела из-за уносимого в обратном направлении импульса разлетающегося вещества.

Уже давно рассматривалось участие процессов теплопроводности в распространении ударной волны. При известных условиях получалось, что сильный перенос тепловой (лучистой) энергии может сгладить скачок. Я. Б. показал, что это справедливо только в том приближении, когда пробег лучистой энергии считается исчезающе малым; при конечной величине пробега скачок давления сохраняется всегда. Надо отметить и работы Я. Б. Зельдовича о лучистом переносе энергии, не связанном с ударной волной. Сюда в первую очередь относится работа об охлаждении воздуха излучением (совместно с А. С. Компанейцем и Ю. П. Райзером), где впервые учитывается резкое изменение прозрачности воздуха при  $10\,000^\circ$ , связанное с ионизацией. Оно приводит к появлению характерной тепловой волны, существование которой Я. Б. предсказал теоретически.

Другой пример нелинейной теплопроводности — задача о распространении тепла из мгновенного источника. В отличие от ливейной теплопроводности, здесь возникает крутой бегущий фронт.

Впоследствии вместе с Г. И. Баренблаттом Я. Б. рассмотрел и тепловой диполь. Эта задача является тепловым аналогом задачи о коротком ударе.

Большое место в творчестве Я. Б., особенно за последнее время, занимает теория элементарных частиц. Здесь ярко проявилась его замечательная интуиция и умение видеть новые качественные особенности явления там, где еще не сформировалась четкая теория.

Наиболее убедительным примером, несомненно, служит открытое им в 1955 г. (вместе со своим молодым и талантливым учеником С. С. Герштейном) явление сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях. Обнаруженная ими глубокая аналогия с электродинамическим взаимодействием лежит сейчас в основе теории.

Универсальность теории слабых взаимодействий позволила Я. Б. Зельдовичу предсказать время жизни  $\beta$ -распада  $\pi$ -мезона. Опыты, поставленные в Дубне и Женеве, обнаружили этот редкий процесс и подтвердили предсказание теории.

Работы Зельдовича и Герштейна по теории катализа ядерных реакций отрицательными мюонами привели к развитию нового направления — мю-мезохимии (взаимодействия мюонов с электронными оболочками атомов) и индуцировали превосходные эксперименты, проведенные в Дубне.

Занятия теорией ядра и физикой элементарных частиц привели Я. Б. Зельдовича к новому предмету — астрофизике. Уже начало этого совсем недавнего периода оказалось отмеченным серией превосходных лекций и рядом статей о применении идей общей теории относительности к вопросам эволюции звезд и вселенной. Остроумные идеи, высказанные им о роли нейтрино в эволюции вселенной, указывают на новые пути, по которым могут пойти дальнейшие исследования. И в этой новой области работы Я. Б. характеризуются неожиданными пересечениями предельно разнообразных идей и методов.

Разносторонность деятельности Якова Борисовича видна еще на одном примере. Хорошо известно, что студент, изучающий высшую математику, часто встречается с большими трудностями при попытках применить свои знания для анализа физических и механических процессов. Яков Борисович разработал такой подход к преподаванию, при котором необходимость дифференцирования и интегрирования становилась очевидной из поставленной задачи.

Основываясь на таком подходе, Я. Б. написал свою «Высшую математику для начинающих», где изложение построено так, что все математические понятия тесно увязаны с конкретными физическими явлениями. Эта книга была хорошо принята преподавателями вузов, оценившими ее как новое веяние в деле распространения математических знаний; она разошлась уже в двух массовых изданиях в нашей стране и издана в ряде других стран.

Приведенное здесь неизбежно далеко не полное перечисление важнейших областей, в которых блестяще работает Я. Б. Зельдович, может дать некоторое представление о его научном облике. Творческая активность ученого продолжает экспоненциально нарастать. Круг его деятельности неуклонно расширяется, по мере подключения новых интересов прежние только углубляются. В наш век узкой специализации Яков Борисович все ближе подходит к идеальному типу универсального ученого, столь редкому в наши дни. Его таланты теоретика и экспериментатора, страстная любовь к науке и неукротимый темперамент разгораются все ярче. Анализ динамики научного творчества Я. Б. дает все основания считать, что оно входит в пору наивысших творческих свершений. Пожелаем же Якову Борисовичу этих успехов на благо науки и человечества.

*Я. А. Смородинский, Д. А. Франк-Каменецкий*

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ТРУДОВ Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧА

## 1. ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

1. Об объемных цепях при каталитических гетерогенных реакциях, ЖФХ 4 (2), 133 (1933) (совместно с С. З. Рогиным).
2. О применении статистической механики к гетерогенным равновесиям, ЖЭТФ 4, 130 (1934) (совместно с В. С. Сорокиным).
3. К вопросу о механизме каталитического окисления окиси углерода на двуокиси марганца, ЖФХ 6, 234 (1935), Acta Phys. 1, 449 (1934).
4. Теория взаимодействия атома и металла, ЖЭТФ 3, 22 (1935).
5. On the theory of the Freundlich adsorption isotherm, Acta Phys. 1 (6), 961 (1935).
6. Вопросы адсорбции. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ЛИХФ, 1936).
7. Потенциальная теория адсорбции, в сб. «Проблемы кинетики и катализа», т. 3, Л., ОНТИ, 1937, стр. 280.
8. Доказательство единственности решения уравнений закона действующих масс, ЖФХ 11(5), 685 (1938).
9. К теории реакции на пористом или порошкообразном материале, ЖФХ 13(2), 163 (1939), Acta Phys. 10(4), 583 (1939).
10. Кинетика образования двухфазных систем вблизи критической точки, ЖЭТФ 10, 441 (1940), Acta Phys. 16 (1/2), 1 (1942) (совместно с О. М. Тодесом).
11. К теории образования новой фазы. Кавитация, ЖЭТФ 12(11/12), 525 (1942).
12. О соотношении между жидким и газообразным состоянием у металлов, ЖЭТФ 14(1/2), 32 (1944), Acta Phys. 18, 194 (1943) (совместно с Л. Д. Ландау).
13. О пространственном распределении осадков при кристаллизации взаимно диффундирующих веществ, ЖФХ 23(2), 156 (1949) (совместно с П. Б. Афанасьевым и О. М. Тодесом).
14. О поверхностном натяжении границы раздела взаимно растворимых жидкостей, ЖФХ 23 (8), 931 (1949).
15. Об исследовании уравнения состояния с помощью механических измерений, ЖЭТФ 32 (6), 1577 (1957).
16. Неметаллический никель при больших сжатиях, ЖЭТФ 44(1), 386 (1963) (совместно с Г. М. Гандельманом и В. М. Ермаченко).

## 2. ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА — ГОРЕНИЕ

1. Предельные законы свободно восходящих конвективных потоков, ЖЭТФ 7, 1463 (1937).
2. К теории равномерного распространения пламени, ДАН СССР 19, 693 (1938) (совместно с Д. А. Франк-Каменецким).
3. Теория теплового распространения пламени, ЖФХ 12, 100 (1938) (совместно с Д. А. Франк-Каменецким).
4. Образование окиси азота при взрывах. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (ЛИХФ, 1939).
5. Теория зажигания накаливаемой поверхностью, ЖЭТФ 9(12), 1530 (1939).
6. Приложение теории распространения произвольного разрыва к некоторым случаям воспламенения газов, ЖЭТФ 10, 569 (1940) (совместно с К. И. Щелкиным).
7. Кинетика химических реакций в пламенах, ЖЭТФ 10, 1116 (1940) (совместно с Н. Н. Семеновым).
8. Влияние числа Грассгофа на пламя, ЖЭТФ 11(1) (1941).
9. К теории теплонапряженности. Протекание экзотермической реакции в струе. 1 ЖТФ 11(6), 494 (1941).
10. Теория предела распространения тихого пламени, ЖЭТФ 11(1), 159 (1941).
11. К теории горения порохов и взрывчатых веществ, ЖЭТФ 12 (11/12) (1942).
12. Диффузионные явления у пределов распространения пламени. Экспериментальные исследования флегматизации взрывчатых смесей окиси углерода, ЖФХ 17 (3) 134 (1943) (совместно с И. П. Дроздовым).
13. Окисление азота при горении и взрывах, ДАН СССР 51 (3), 213 (1946).
14. Об условиях возникновения неустойчивости нормального горения, ДАН СССР 57 (4), 365 (1947) (совместно с А. И. Розловским).
15. К теории распространения пламени, ЖФХ 22 (1), 27 (1948).
16. О горении неперемешанных газов, ЖТФ 19 (9) (1949).
17. К теории искрового воспламенения газовых взрывчатых смесей, ЖФХ 23(11), (1949) (совместно с Н. Н. Симоновым).
18. Адиабатическое воспламенение быстрогорящих газовых смесей, ЖФХ 24, 85 (1950) (совместно с Я. Гершаником и А. Розловским).

19. К теории распространения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры, в «Сборнике, посвященном 70-летию академика А. Ф. Иоффе», М., Изд-во АН СССР, 1950, стр. 61 (совместно с А. С. Компанейцем).
20. Кинетика горения окиси углерода, ЖФХ 25, 523 (1951) (совместно с Г. А. Барским).
21. Об устойчивости распространения пламени, ПММ 21(6) (1957) (совместно с Г. И. Баренблаттом).
22. Theory of flame propagation, Combustion and Flame 3 (1), 61 (1959) (совместно с Г. И. Баренблаттом).
23. Цепные реакции в горячих пламенах — приближенная теория скорости пламени, Кинетика и катализ 2 (3), 305 (1961).
24. О диффузионно-тепловой устойчивости ламинарного пламени, ПМТФ, № 4, 21 (1962) (совместно с Г. И. Баренблаттом и А. Г. Истратовым).
25. О возможных режимах стационарного горения, ПМТФ, № 4, 27 (1962) (совместно с Р. М. Зайделем).
26. Об устойчивости горения пороха в полузамкнутом объеме, ПМТФ, № 1, 67 (1963).
27. К теории зажигания, ДАН СССР 150 (2), 283 (1963).

### 3. ФИЗИКА УДАРНЫХ ВОЛН И ДЕТОНАЦИИ

1. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения, ЖТФ 10(17), 1453 (1940).
2. К теории распространения детонации в газообразных системах, ЖЭТФ 10, 542 (1940).
3. О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности при сферическом распространении детонационной волны, ЖЭТФ 12 (9), 389 (1942).
4. Изучение химических реакций в ударной волне. Теория метода и результаты предварительных опытов, Acta Phys. 18, 167 (1943) (совместно с О. И. Лейпунским).
5. Получение рекордных температур, ЖЭТФ 13, 181 (1943), Journ. of Phys. USSR 7 (5) (1943) (совместно с О. И. Лейпунским).
6. К теории детонационного спина, ДАН СССР 52 (2), 147 (1946).
7. О возможности ударных волн разрежения, ЖЭТФ 16 (4), 363 (1946).
8. О распространении ударных волн в газе с обратимыми химическими реакциями ЖЭТФ 16 (4), 365 (1946).
9. К теории возникновения детонации в газах, ЖТФ 17 (1), 3 (1947).
10. Об отражении плоской детонационной волны, ДАН СССР 55 (7), 591 (1947) (совместно с К. П. Станюковичем).
11. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке, ЖЭТФ 17 (10), 889 (1947) (совместно с Б. В. Айвазовым).
12. Воспламенение взрывчатых газовых смесей в ударных волнах, ДАН СССР 65 (6), 871 (1949) (совместно с В. Я. Шляпникозом).
13. О детонации водородо-воздушных смесей, ЖФХ 24(7), 778 (1950) (совместно с А. М. Бродским).
14. Экспериментальное исследование сферической газовой детонации, ЖТФ 26 (8), 1744 (1956) (совместно с С. М. Когарко и Н. Н. Симоновым).
15. Магнитное поле в проводящей турбулентной жидкости при двумерном движении ЖЭТФ 31, 154 (1956).
16. Ударные волны большой амплитуды в воздухе, ЖЭТФ 32 (5), 1126 (1957).
17. Цилиндрические автомодельные акустические волны, ЖЭТФ 33, 700 (1957).
18. Ударные волны большой амплитуды в газах, УФН 63 (3), 613 (1957) (совместно с Ю. П. Райзером).
19. Об охлаждении воздуха излучением. 1. Общая картина явления и слабая волна охлаждения, ЖЭТФ 34(5), 1278 (1958) (совместно с А. С. Компанейцем и Ю. П. Райзером).
20. Об охлаждении воздуха излучением. 2. Сильная волна охлаждения, ЖЭТФ 34 (6), 1447 (1958) (совместно с А. С. Компанейцем и Ю. П. Райзером).
21. Физические явления при распылении в вакуум твердых тел, сжатых сильными ударными волнами, ЖЭТФ 35 (6), 1402 (1958) (совместно с Ю. П. Райзером).
22. Температура и теплоемкость плексигласа, сжатого ударной волной, ДАН СССР 122(1), 48 (1958).
23. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна, ЖЭТФ 36(3), 782 (1959).
24. Исследование распределения плотности во фронте детонации газовых смесей рентгенографическим методом, ДАН СССР 125(6), 1288 (1959) (совместно с М. А. Ривным).
25. Об устойчивости одномерной детонации и ее затухании, ПМТФ, № 6 (1963) (совместно с Р. М. Зайделем).



## 4. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

1. К вопросу о цепном распаде основного изотопа урана, ЖЭТФ 9, 1425 (1939) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
2. Деление и цепной распад урана, УФН 23, 239 (1940) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
3. О цепном распаде урана под действием медленных нейтронов, ЖЭТФ 10, 29 (1940) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
4. Кинетика цепного распада урана, ЖЭТФ 10, 477 (1940) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
5. К теории развала ядер, ЖЭТФ 10, 831 (1940) (совместно с Ю. А. Зысиным).
6. Об одном свойстве контактов, ЖЭТФ 10, 1422 (1940) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
7. Механизм деления ядра, УФН 25, 381 (1941) (совместно с Ю. Б. Харитоном).
8. О поляризации  $\gamma$ -квантов при комптоновском рассеянии на  $180^\circ$ , ДАН СССР 83 (1), 63 (1952).
9. К теории элементарных частиц. Сохранение ядерного заряда и возможный новый тип  $\nu$ -частиц, ДАН СССР 86 (3), 505 (1952).
10. О нейтринном заряде элементарных частиц, ДАН СССР 91(6), 1317 (1953).
11. Использование разрешенных  $\beta$ -превращений для определения взаимодействия, вызывающего  $\beta$ -распад, Изв. АН СССР, сер. физ. 18 (2), 243 (1954).
12. Реакции, вызываемые  $\mu$ -мезонами в водороде, ДАН СССР 95(3), 493 (1954).
13. К теории  $\pi$ -мезонов, ДАН СССР 97 (2), 225 (1954).
14. О распаде заряженных  $\pi$ -мезонов, ДАН СССР 97 (3), 421 (1954).
15. О распаде и разности масс тяжелых нейтральных мезонов, ЖЭТФ 30(6), 1168 (1956).
16. Развитие теории античастиц, заряды элементарных частиц и свойства тяжелых нейтральных мезонов, УФН 59 (3), 377 (1956), Anal. Rom-Sov., Mat.-fiz., 1957, Ap. XI, ser. III-a, № 2 (21), 52 (1957).
17. О реакциях, вызываемых  $\mu$ -мезонами в водороде, ЖЭТФ 32 (4), 947 (1957) (совместно с А. Д. Сахаровым).
18. О возможной эффективности мезонного катализа ядерных реакций, ЖЭТФ 33 (7), 310 (1957).
19. Вариант теории гиперонов, ЖЭТФ 33, 829 (1957).
20. Соотношение между асимметрией распада и дипольным моментом элементарных частиц, ЖЭТФ 33, 1488 (1957).
21. Электромагнитное взаимодействие при нарушении четности, ЖЭТФ 33, 1531 (1957).
22. Тяжелый нейтральный мезон: распад и способ обнаружения, ЖЭТФ 34, 1644 (1958).
23. Образование мезомолекул водорода, ЖЭТФ 35, 649 (1958) (совместно с С. С. Герштейном).
24. Универсальное ферми-взаимодействие и захват  $\mu$ -мезона протонами, ЖЭТФ 35, 821 (1958) (совместно с С. С. Герштейном).
25. Об аннигиляции  $\mu^+\mu^-$  и распаде нейтральных мезонов, ЖЭТФ 36, 646 (1959).
26. Несохранение четности первого порядка по константе слабого взаимодействия в рассеянии электронов и других эффектах, ЖЭТФ 36 (3), 964 (1959).
27. Превращение  $K_2^0 \rightarrow K_1^0$  на электронах, ЖЭТФ 36 (5), 1381 (1959).
28. Хранение холодных нейтронов, ЖЭТФ 36 (6), 1952 (1959).
29. Число элементарных барионов и гипотеза универсального отталкивания барионов, ЖЭТФ 37 (2), 569 (1959).
30. Об условиях применимости статистических формул к вырожденному ферми-газу, ЖЭТФ 37, 1296 (1959) (совместно с Е. М. Рабиновичем).
31. О массе  $\mu$ -мезона и электрона, ЖЭТФ 37, 1817 (1959).
32. Квазистабильные состояния с большим изотопическим спином у легких ядер, ЖЭТФ 38, 278 (1960).
33. Рассеяние сингулярным потенциалом в теории возмущений и в импульсном представлении, ЖЭТФ 38, 819 (1960).
34. О существовании новых изотопов легких ядер и уравнении состояния нейтронов, ЖЭТФ 38, 1123 (1960).
35. К теории нестабильных состояний, ЖЭТФ 39, 776 (1960).
36. Влияние слабого взаимодействия на электромагнитные свойства частиц, ЖЭТФ 39, 1115 (1960) (совместно с А. М. Переломовым).
37. Дипольный момент нестабильных элементарных частиц, ЖЭТФ 39, 1483 (1960).
38. Формфактор  $K_{\mu 3}$ - и  $K_{e3}$ -распада, ЖЭТФ 39, 1766 (1960).
39. Неоткрытые изотопы легких ядер, УФН 72 (2), 211 (1960) (совместно с А. И. Ба-зем и В. И. Гольданским).

## 5. КОСМОГОНИЯ

1. О ядерных реакциях в сверхплотном холодном водороде, ЖЭТФ 33(4/10), 991 (1957).
2. О верхнем пределе плотности нейтрино, гравитонов и барионов во Вселенной, ЖЭТФ 41 (9), 907 (1961) (совместно с Я. А. Смородинским).

3. Уравнение состояния при сверхвысокой плотности и релятивистские ограничения, ЖЭТФ 41 (5), 1609 (1961).
4. Коллапс малой массы в общей теории относительности, ЖЭТФ 42 (2), 641 (1962).
5. Полузамкнутые миры в общей теории относительности, ЖЭТФ 43(3/9), 1037 (1962).
6. Дозвездное состояние вещества, ЖЭТФ 43 (4/10), 1561 (1963).
7. Проблемы современной физики и астрономия, УФН 78 (4), 549 (1962).
8. Энергия случайного движения в расширяющейся Вселенной, ЖЭТФ 45 (4/10), 1150 (1963) (совместно с И. А. Дмитриевым).

#### 6. МОНОГРАФИИ

1. Теория горения и детонации газов, М., Изд-во АН СССР, 1944.
  2. Теория ударных волн и введение в газодинамику, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.
  3. Расчеты тепловых процессов при высокой температуре, М., Изд. Бюро новой техники, 1947 (совместно с А. И. Полярным).
  4. Окисление азота при горении, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947 (совместно с П. Я. Садовниковым и Д. А. Франк-Каменецким).
  5. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах, М., Изд. Моск. мех. ин-та, 1947 (совместно с В. В. Воеводским).
  6. Турбулентное и гетерогенное горение, М., Изд. Моск. мех. ин-та, 1947 (совместно с Д. А. Франк-Каменецким).
  7. Теория детонации, М., Гостехиздат, 1955 (совместно с А. С. Компанейцем).
  8. Высшая математика для начинающих, М., Физматгиз, 1961.
  9. Импульс реактивной силы пороховых ракет, М., Оборонгиз, 1963 (совместно с М. А. Ривным и Д. А. Франк-Каменецким).
  10. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М., Физматгиз, 1963 (совместно с Ю. П. Райзером).
-