

Рис. 19. Экспорт энергоресурсов, млн тонн углеводородного топлива.

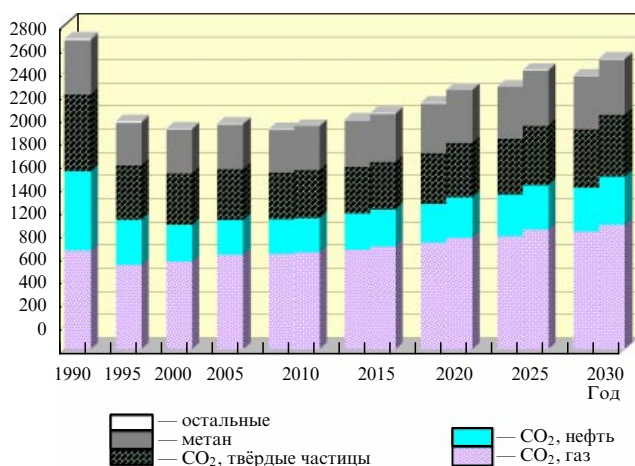


Рис. 20. Выбросы парниковых газов по видам топлива.

рис. 18). Добыча нефти возрастёт от сегодняшних 480 млн тонн до 500–535 млн тонн к 2030 г. преимущественно за счёт Восточной Сибири и Дальнего Востока, но основной прирост производства энергоресурсов обеспечит добыча природного газа до 855–885 млрд м³ в 2030 г. главным образом на Ямале и Штокмановском месторождении, а также в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Предусматривается также опережающий рост добычи угля, до 420–425 млн тонн в 2030 г., в основном в Кузнецком и Канско-Ачинском бассейнах.

Это позволит увеличить к 2020 г. экспорт топлива (относительно сниженного в кризис уровня 2010 г.) на 16–17 % с последующей стабилизацией или даже снижением (рис. 19) при замещении нефтяного экспорта (с 61,5 % до 49–50 %) экспортом природного газа по трубопроводам (рост от 34 % до 37–39,5 %) и в сжиженном виде (до 3–4 %).

Такое развитие российской энергетики позволит вплоть до 2030 г. сохранить уровень выброса парниковых газов ниже уровня 1990 г. (рис. 20). При этом капиталовложения в развитие энергетики составят в целом за период 3,5–3,7 % от ВВП страны, сокращаясь с текущих 4–5 % до 3 % в 2026–2030 гг. Таким образом, главные социально-экономические параметры энерге-

тики могут заметно улучшиться по сравнению с аналогичными параметрами в докризисных прогнозах.

Для получения указанных результатов наша энергетическая наука должна конкретизировать с учётом мировых тенденций российские приоритеты НТП и создать технологии с параметрами, отвечающими российским условиям. Важно также закрепить документами Энергетической стратегии состав, параметры, сроки и масштаб применения приоритетных энергетических технологий с необходимым их финансированием.

Список литературы

1. Макаров А А *Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство* (М.: Энергоатомиздат, 1998) с. 17–23
2. Мелентьев Л А *Системные исследования в энергетике: элементы теории, направления развития* 2-е изд. (М.: Наука, 1983)
3. Путвинский С В *УФН* **168** 1235 (1998) [Putvinskii S V *Phys. Usp.* **41** 1127 (1998)]
4. *World Energy Outlook 2008* (Paris: Intern. Energy Agency, 2008); <http://www.worldenergyoutlook.org/2008.asp>
5. *Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050* (Paris: Intern. Energy Agency, 2008)
6. Фортгов В Е, Шпильрайн Э Э *Энергия и энергетика* (М.: Букос, 2004)
7. Велихов Е П и др. *Россия в Мировой энергетике XXI века* (М.: ИздАТ, 2006)
8. Фортгов В Е *Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе* (М.: Наука, 2008)
9. Волков Э П *Докл. РАН* (2009) (в печати)
10. Фортгов В Е, Леонов Ю Г (Ред.) *Энергетика России: Проблемы и перспективы. Тр. науч. сессии РАН: Общ. собр. РАН, 19–21 декабря 2005 г.* (М.: Наука, 2006)
11. Гинзбург В Л *УФН* **175** 187 (2005); **177** 346 (2007) [Ginzburg V L *Phys. Usp.* **48** 173 (2005); **50** 332 (2007)]
12. Макаров А А, Фортгов В Е *Вестн. РАН* **74** 195 (2004) [Makarov A A, Fortov V E *Herald Russ. Acad. Sci.* **74** 131 (2004)]
13. Адамов Е О и др. *Энергетика России. Стратегия развития 2000–2020* (М.: Энергия, 2003)
14. Макаров А А *Вестн. РАН* **79** 206 (2009) [Makarov A A *Herald Russ. Acad. Sci.* **79** 99 (2009)]

PACS numbers: 01.65. + g, 52.35. – g, 52.55. – s

DOI: 10.3367/UFN.0179.200912m.1353

Арцимович и сильнейшие гидродинамические неустойчивости

А.М. Фридман

Краткая предыстория того, как Лев Андреевич представил мою дипломную работу в ДАН СССР, состоит в следующем.

В 1962 г. в журнале *Phys. Rev. Lett.* была опубликована статья [1] известного американского экспериментатора Желе, в которой он демонстрировал увеличение диффузии слабоионизованной плазмы поперёк магнитного поля при монотонном увеличении напряжённости магнитного поля начиная с некоторого её значения.

Результаты этих экспериментов, казалось бы, противоречили хорошо известным результатам более ранних экспериментов, которые показывали, что как классический коэффициент диффузии, так и бомовский уменьшались с возрастанием величины магнитного поля H .

Уезжая летом этого же, 1962 года, в летний отпуск, мой учитель Роальд Сагдеев сказал: "Значит так, когда я через месяц приеду из отпуска и на моём столе будет лежать твоя статья с объяснением экспериментов Желе,

то по окончании НГУ ты станешь аспирантом ИЯФ*, а не будет такой статьи — будешь аспирантом НГУ".

По приезде Роальда из отпуска на его столе лежала эта статья, и он договорился с Львом Андреевичем о рассказе её на семинаре "Т" (семинаре по термояду) в ЛИПАНе (так тогда назывался Институт Курчатова — Лаборатория измерительных приборов АН). Через день после доклада на семинаре Сагдеев сказал мне, что Лев Андреевич предлагает представить мою дипломную работу в ДАН (см. [2]), но перед этим он бы хотел со мной поговорить.

Разговор с Арцимовичем мне запомнился на всю жизнь. Я был просто потрясён увиденным и услышанным. Мне в голову не приходило, что сделанное мною можно было так просто показать на пальцах. Всё, кроме некоторого коэффициента $k \ll 1$, Лев Андреевич сумел объяснить на совершенно тривиальном уровне.

Чтобы не быть голословным, я попробую в течение нескольких минут пролистать пять страниц моего диплома.

Здесь показаны основные используемые в работе [2] уравнения, описывающие динамику слабоионизованной плазмы, где электроны замагничены, а ионы нет:

$$\frac{d}{dx}(T\delta n) - en_0 \frac{d}{dx} \delta\varphi + \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ey} B + \frac{d \ln n(x)}{dx} T \delta n = 0, \quad (1)$$

$$ik_y T \delta n - ik_y en_0 \delta\varphi - \frac{e}{c} n_0 \delta v_{ex} B = 0, \quad (2)$$

$$ik_z T \delta n - ik_z en_0 \delta\varphi = -n_0 m_e (v_{ei} + v_{en}) \delta v_{ez} - n_0 m_e v_{ei} \delta v_{iz}, \quad (3)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(\mathbf{v}_{e0} \delta n) + \text{div}(\delta \mathbf{v}_e n_0) = 0, \quad (4)$$

$$i\omega m_i \delta v_{ix} + e \frac{d}{dx} \delta\varphi = 0, \quad (5)$$

$$\omega m_i \delta v_{iy} + ek_y \delta\varphi = 0, \quad (6)$$

$$\omega m_i \delta v_{iz} + ek_z \delta\varphi = 0, \quad (7)$$

$$i\omega \delta n + \text{div}(n_0 \delta \mathbf{v}_i) + \text{div}(\mathbf{v}_{i0} \delta n) = 0, \quad (8)$$

где T — температура электронов (в предположении, что $T_e \gg T_i$); e — заряд электрона; c — скорость света в вакууме; m_e , m_i — соответственно массы электрона и иона; v_{ei} , v_{en} — частоты соответственно электрон-ионных, электрон-нейтральных столкновений; \mathbf{v}_e , \mathbf{v}_i — направленные скорости соответственно электронов и ионов. В уравнениях (5)–(7) мы пренебрегли диссипативными членами ввиду условия $\omega \gg v_{in}$.

Система уравнений (1)–(8) в области максимальной плотности может быть сведена к уравнению типа Шрёдингера

$$\frac{d^2 \delta\varphi}{dx^2} + 2 \left(E - \frac{\tilde{\omega}^2 x^2}{2} \right) \delta\varphi = 0 \quad (9)$$

для линейного осциллятора с комплексными энергией

$$E = \frac{ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2}{2 \left(i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)} - \frac{k_y^2}{2} \quad (10)$$

и частотой

$$\tilde{\omega}^2 = - \frac{\frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{\ln' n_0}{k_y} \frac{1}{R^2} \left(ik_z^2 \frac{\omega^2}{v_{en}} \frac{m_i}{m_e} + \frac{v_{en}}{v_{en} + v_{ei}} \omega k_z^2 \right)}{\left(i \frac{k_z^2}{v_{en}} \frac{T}{m_e} - \omega + \frac{\omega^2}{\omega_{Hi}} \frac{1}{k_y} \frac{d \ln n_0}{dx} \right)^2}. \quad (11)$$

Как известно, решение такого уравнения находится в виде функций Эрмита:

$$\delta\varphi_{\tilde{n}} = \left(\frac{\tilde{\omega}}{\pi} \right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^{\tilde{n}} \tilde{n}!}} \exp \left(-\frac{\tilde{\omega}}{2} x^2 \right) H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}}), \quad (12)$$

где $H_{\tilde{n}}(x\sqrt{\tilde{\omega}})$ — функция Эрмита, $\tilde{n} = 0, 1, 2, \dots$

В результате можно найти величину напряжённости критического магнитного поля

$$B_c \sim \frac{c}{e} \sqrt[4]{T \frac{m_e m_i^2}{R^2} v_{en} v_{in}}, \quad (13)$$

которое совпадает с данными в работе Желе [1] (теоретическая кривая легла на экспериментальные точки).

В работе [2] была найдена новая неустойчивость, зависимость инкремента которой от величины магнитного поля оказалась обратной той, которая имела место для инкремента дрейфовой неустойчивости. Поэтому эта новая неустойчивость была названа мною "антидрейфовой".

Так, с "благословения" Л.А. Арцимовича была опубликована моя первая статья по гидродинамическим неустойчивостям, любовь к красивой физике которых сохранилась у меня, благодаря Льву Андреевичу, навсегда. Именно поэтому и основная тема моего выступления на научной сессии ОФН РАН, посвящённой памяти Л.А. Арцимовича "Предсказание и открытие сильнейших гидродинамических неустойчивостей, вызванных скачком скорости: теория и эксперименты" (одноимённый обзор [3], опубликованный в УФН в прошлом году, отражает содержание моего сегодняшнего выступления).

Список литературы

1. Geller R *Phys. Rev. Lett.* **9** 248 (1962)
2. Фридман А М *ДАН СССР* **154** 567 (1963) [Fridman A M *Sov. Phys. Dokl.* **9** 75 (1964)]
3. Фридман А М *УФН* **178** 225 (2008) [Fridman A M *Phys. Usp.* **51** 213 (2008)]

PACS numbers: **01.65. +g**, **28.60. +s**, 29.25.Ni
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912n.1354

Электромагнитное разделение изотопов и его наследие

Ю.В. Мартыненко

В докладе даётся краткая история развития в СССР электромагнитного метода разделения изотопов, а также его наследия — новых направлений науки и техники, порождённых работами по электромагнитному разделению изотопов.

Сейчас имя Льва Андреевича Арцимовича ассоциируется прежде всего с термоядерным синтезом и термоядерной энергией. С самого начала Л.А. Арцимович

* НГУ — Новосибирский государственный университет, ИЯФ — Институт ядерной физики СО АН СССР. (Примеч. ред.)