

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА

Я.Б. Зельдович и ядерная энергетика

Л.И. Пономарёв

Гомогенный ядерный реактор впервые был рассмотрен в работе Я.Б. Зельдовича и Ю.Б. Харитона в 1939 г. С тех пор эта идея претерпевала взлёты и падения и сегодня вновь возродилась, но уже вобрав в себя знания и опыт прошедших лет. Представлена одна из современных версий развития идеи гомогенного реактора — жидкосолевого с U–Pu-топливным циклом.

PACS numbers: 01.65.+g, 28.41.–i, 28.50.–k

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403a.0227

Сообщение об открытии деления урана достигло Ленинграда в марте 1939 г., а вскоре появились работы Фриша, Пайерлса, Ферми и Сциларда, Жолио-Кюри с сотрудниками и др., из которых, в частности, следовало, что при делении ядра урана освобождается 2–3 нейтрона, т.е. в принципе в уране возможна незатухающая цепная реакция с выделением огромной энергии. Я.Б. Зельдовичу и особенно Ю.Б. Харитону, сотруднику Н.Н. Семёнова, тематика цепных химических реакций была близка, и они немедленно использовали свои знания для изучения возможности реализации цепной ядерной реакции в уране. К концу их занятий появился обстоятельный обзор Бора и Уилера, посвящённый делению урана, но Зельдовича и Харитона интересовал не сам механизм деления, а кинетика этого процесса. В своей первой небольшой заметке "К вопросу о цепном распаде основного изотопа урана" [1] (поступившей в редакцию ЖЭТФ 7 октября 1939 г.) они рассмотрели возможность реализации цепной реакции в бесконечной среде урана с учётом замедления и поглощения нейтронов. Тогда гипотеза Бора о том, что практически все наблюдаемые осколки деления принадлежат редкому изотопу ^{235}U , а не "основному изотопу" ^{238}U , ещё не была подтверждена экспериментально, поэтому Зельдович и Харитон считали, что деление ^{235}U вносит только "весьма малое дополнительное количество нейтронов". Определённых выводов в статье [1] нет, поскольку в то время ещё не было надёжных данных ни о числе вторичных нейтронов деления (ν), ни о их начальной энергии и плохо были известны сечения деления (σ_f) и захвата (σ_c) нейтронов в уране (особенно в резонансной области) (рис. 1). Однако методология исследования в статье уже обозначена и даже сформулированы критерии для экспериментального доказательства осуществимости цепной реакции в

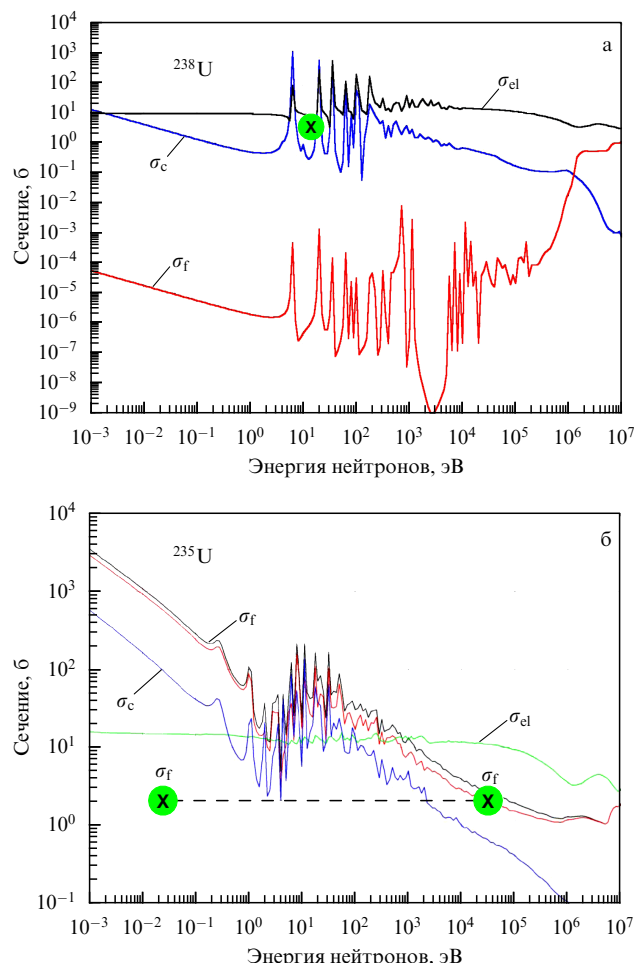


Рис. 1. Сечения деления σ_f , захвата σ_c и упругого рассеяния σ_{el} изотопов (а) ^{238}U и (б) ^{235}U . Кругами отмечены значения сечений, используемые в работах [1–3].

Л.И. Пономарёв. Высокотехнологичный научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара ул. Рогова 5а, 123098 Москва, Российская Федерация E-mail: leonidp2008@mail.ru

Статья поступила 8 октября 2013 г.,
после доработки 11 декабря 2013 г.

уране. (Вывод о невозможности цепной реакции в природном уране сделан авторами в примечании при корректуре.)

Уже через две недели (22 октября 1939 г.) в печать была направлена вторая статья: "О цепном распаде урана

под действием медленных нейтронов" [2]. В ней впервые было подчеркнуто различие физики реакций деления под действием быстрых и медленных нейтронов, систематически рассматривалось резонансное поглощение нейтронов в уране в присутствии замедлителя (водорода), а также условия, при которых возможна цепная реакция в ^{235}U . В этой же статье появились обозначения ν , ν , ϕ , которые знакомы теперь каждому студенту-ядерщику и условие, необходимое для возникновения цепной реакции: $\nu\phi = 1$. Несмотря на бедность экспериментальных данных, вычисленное в статье значение $\phi = 0,844$ (вероятность избежать резонансного захвата нейтрона в ^{238}U) достаточно хорошо согласуется с результатами позднейших расчётов. В статье [2] сделан уверенный вывод о невозможности цепной реакции в гомогенной смеси воды и уранилнитрата, однако отмечается, что при замене обычной воды (H_2O) тяжёлой водой (D_2O), а также при замене природного урана ураном, обогащённым изотопом ^{235}U (до 1–2 %), цепная реакция становится возможной. Как мы теперь знаем, обе эти возможности впоследствии были реализованы.

Наконец, в апреле 1940 г. в журнале *Успехи физических наук* был опубликован обстоятельный обзор Я.Б. Зельдовича и Ю.Б. Харитона "Деление и цепной распад урана" [3]. К тому времени уже было выполнено довольно много экспериментальных и теоретических работ по физике деления урана (библиография обзора содержит 85 названий), и с учётом новых результатов заключения их статей в *ЖЭТФ* [1, 2] были уточнены, хотя основные утверждения остались неизменными:

- в гомогенной смеси природного урана с водой цепная реакция невозможна;
- для осуществления цепной реакции необходимо обогащение природного урана изотопом ^{235}U либо замена обычной воды тяжёлой.

В мае 1941 г. к Я.Б. Зельдовичу и Ю.Б. Харитону присоединился И.И. Гуревич и вместе они выполнили исследование "Критические размеры и масса, необходимые для цепного деления ядер нейтронами", которое тут же было засекречено (оно будет опубликовано только через полвека [4]). В этих расчётах для ^{235}U они использовали значения $\sigma_c = 0$, $\sigma_f = 3 \times 10^{-24} \text{ см}^2$, значение ν варьировали от 2 до 4, а сечение упругого рассеяния изменяли в пределах $\sigma_{el} = (3-6) \times 10^{-24} \text{ см}^2$. При этих предположениях Зельдович, Харитон и Гуревич получили для критической массы ^{235}U "реактора на быстрых нейтронах" (иначе говоря, атомной бомбы) разумные значения — от 0,9 кг до 16,6 кг. В этой же статье были рассмотрены условия достижения критичности в реакторе на тепловых нейтронах с водой в качестве замедлителя и было показано, что при обогащении урана изотопом ^{235}U до 4–5 % такой гомогенный реактор может достичь критичности при соотношении концентраций урана и водорода $\sim 0,1-0,2$. (Отметим, что в то время идея гетерогенного реактора ещё не стала общепринятой и всё рассмотрение проводилось для гомогенной жидкой смеси замедлителя и растворённой в нём соли урана.)

Как известно, цепная реакция деления в природном уране впервые была осуществлена Ферми в гетерогенном реакторе, который представлял собой решётку из урановых блоков в толще графита. Несколько подобных уран-графитовых реакторов (РБМК — реактор большой мощности канальный) до сих пор работает на атомных

электростанциях (в них используют уран, обогащённый изотопом ^{235}U до $\approx 2\%$). Но основу ядерной энергетики ($\approx 80\%$) образуют твердотопливные водо-водяные энергетические реакторы (БВЭР) (Pressurized Water Reactor (PWR), Boiling Water Reactor (BWR)), в которых вода является одновременно и замедлителем, и теплоносителем, а в качестве топлива используются таблетки урана, обогащённого изотопом ^{235}U до 3–5 %. Сейчас в мире работают около 440 ядерных реакторов общей мощностью $\approx 370 \text{ ГВт}$, которые вырабатывают $\approx 14\%$ электроэнергии, и, кроме того, примерно 500 судовых реакторов на кораблях и подводных лодках.

На фоне этих успехов атомной энергетики идея гомогенного реактора ушла в тень, хотя первый такой реактор мощностью 5 кВт был построен в Лос-Аламосе ещё в 1944 г. и Ферми принимал самое активное участие в его создании. (Реактор представлял собой шар диаметром 30 см, заполненный раствором соли ^{235}U в воде.) По свидетельству Эмилио Сегре, даже во время своей напряжённой работы над атомной бомбой в Лос-Аламосе Ферми часто обсуждал идею гомогенного реактора (как он говорил, "кипящего") [5, 6]. Ученик Ферми и участник пуска первого реактора Алвин Вайнберг осуществил эту мечту: в 1965 г. в Окридже (США) он запустил жидко-солевой реактор MSRE (Molten-Salt Reactor Experiment), в котором топливом служил расплав соли $2\text{LiF} - \text{BeF}_2$ с растворёнными в нём фторидами урана (UF_4) и тория (ThF_4), а замедлителем — графит [7]. Тепловой спектр нейтронов этого реактора был ориентирован на Th–U-цикл, и большую часть времени он работал именно в этом цикле. Реактор MSRE проработал безаварийно около пяти лет, но был закрыт в связи с проектом реактора на быстрых нейтронах. Сегодня в мире работает только один жидко-солевой реактор — "Аргус" мощностью 20 кВт, в котором топливом служит раствор уранилсульфата (UO_2SO_4) в воде с 90%-ным обогащением по ^{235}U (Курчатовский институт).

Освобождение энергии деления ядра — самое крупное достижение человечества со времён приручения им огня. Но уже Ферми понимал, что ядерная энергетика (ЯЭ), основанная на тепловых реакторах, потребляющих редкий изотоп ^{235}U , не имеет устойчивого будущего без решения четырёх ключевых проблем, о которых в угаре военной гонки особо не задумывались:

- ресурсное обеспечение;
- безопасность;
- нераспространение делящихся материалов;
- замыкание ядерного топливного цикла.

Первая проблема — ключевая: мировые ресурсы коммерческого ^{235}U (которого в природном уране всего 0,72 %) оцениваются примерно в 50 тыс. тонн, современное потребление составляет около 600 т в год и к середине столетия оно возрастёт приблизительно до 1000 т в год [8], т.е. ресурс современной ЯЭ на тепловых нейтронах не превышает 50–100 лет. Хорошо известно, однако, что проблема ресурсов ЯЭ может быть решена при переходе от тепловых реакторов, потребляющих ^{235}U , к быстрым реакторам, потребляющим ^{238}U . Имеются также серьёзные аргументы в пользу того, что при этом попутно будет решена и проблема обращения с долгоживущими радиоактивными отходами ЯЭ. Проблема безопасности также может быть решена, если удастся создать быстрый реактор с естественной безопасностью (inherent safety [9]).

Такой реактор должен удовлетворять, помимо прочих, следующим требованиям [10]:

- минимальный избыток реактивности;
- отрицательные температурный и объёмный коэффициенты;
- отсутствие пожароопасных и химически активных теплоносителей;
- отсутствие давления в первом контуре.

В реакторе на быстрых нейтронах происходит деление не только ^{235}U , но и ^{238}U , а также ^{239}Pu , который образуется в реакции захвата нейтрона $n + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu} + \gamma$. При делении ^{239}Pu образуется $\nu = 2,84$ вторичных нейтронов вместо $\nu = 2,42$ при делении ^{235}U . Кроме того, для ^{239}Pu в быстром реакторе отношение $\alpha = \sigma_c/\sigma_f \approx 0,1-0,2$ (вместо $\alpha \approx 0,4$ в тепловом), что приводит к дополнительной генерации нейтронов, которые могут быть использованы, в частности, для расширенного воспроизводства ^{239}Pu . Однако идея использовать наработанный ^{239}Pu в тепловых реакторах оказалась ущербной, поскольку при этом почти 30 % ^{239}Pu превращается в изотопы ^{240}Pu и ^{241}Pu , а последний — в транс-урановые элементы Am и Cm — наиболее опасную часть радиоактивных отходов (в быстрых реакторах эта доля снижается до $\approx 10\%$).

Оказалось также, что в быстром реакторе при концентрации $\approx 10\%$ ^{239}Pu (или $\approx 13\%$ ^{235}U) в смеси U и Pu возможен равновесный режим ядерного горения: реактор достаточно подпитывать только ^{238}U , поскольку он эффективно воспроизводит сгоревший ^{239}Pu при захвате нейтрона. Такой промышленный реактор мощностью 350 МВт впервые был построен в СССР в 1972 г., и он успешно проработал 25 лет. Сейчас в России работает единственный в мире промышленный быстрый реактор БН-600 мощностью 600 МВт, в котором теплоносителем служит пожароопасный натрий, и разрабатывается быстрый реактор со свинцовым теплоносителем [11]. В этих реакторах могут быть решены сразу две ключевые проблемы: ресурсная (горят ^{239}Pu и ^{238}U вместо ^{235}U) и проблема уничтожения транс-урановых элементов. Однако для замыкания ядерного топливного цикла (т.е. многократного использования отработавшего топлива) необходимо решить довольно трудную инженерную и технологическую задачу изготовления новых твердотопливных элементов из высокоактивного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), выгружаемого из реактора.

Это только одна из причин возрождения идеи гомогенного реактора, в котором в качестве ядерного топлива используется расплав фторидной соли с растворёнными в нём солями урана и плутония. Для такого реактора нет необходимости изготавливать твердотопливные элементы, но для замыкания ядерного топливного цикла необходимо, чтобы спектр нейтронов жидкосолевого реактора (ЖСР) был быстрым. А это в свою очередь возможно только в том случае, если в расплаве соли концентрация атомов урана и плутония составляет не менее 10 ат. % (около 50 % по массе). Такая соль, однако, до сих пор не была известна (растворимость PuF_3 в расплаве соли $2\text{LiF}-\text{BeF}_2$ не превышает ≈ 1 мол. %), и только в последние два года было установлено, что в эвтектике $\text{LiF}-\text{NaF}-\text{KF}$ (FLiNaK) при температуре 700°C (рабочая температура ЖСР) растворяется ≈ 45 мол. % UF_4 и ≈ 30 мол. % PuF_3 (рис. 2) [12–15]. Спектр нейтронов такого жидкосолевого реактора достаточно близок к спектру твердотопливного быстрого реактора (рис. 3) [16, 17].

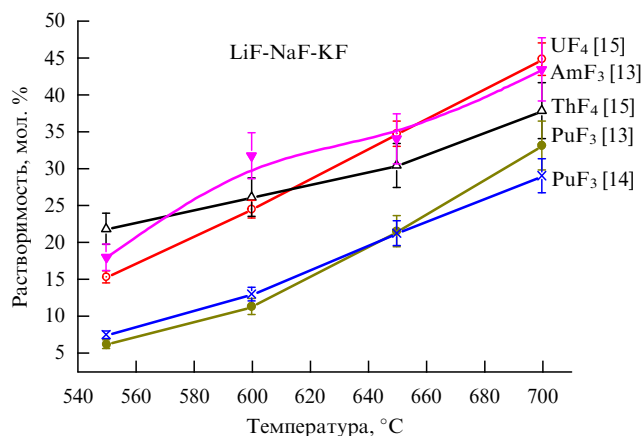


Рис. 2. Растворимость фторидов актинидов в FNiNaK.

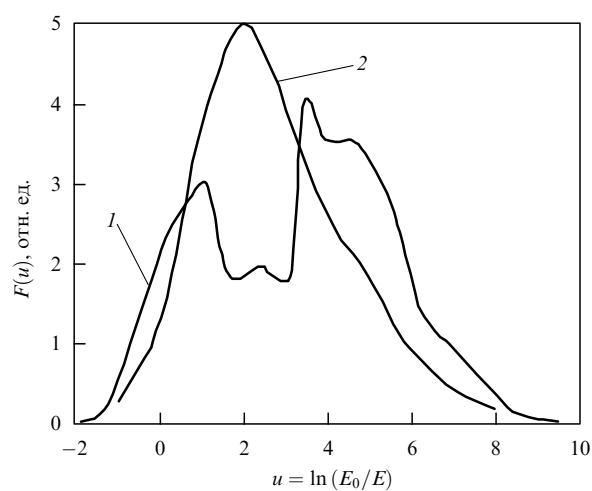


Рис. 3. Спектры $F(u)$ нейтронов ЖСБР (кривая 1) и быстрого реактора (кривая 2) как функции латергии u ($E_0 = 2$ МэВ) [16, 17].

ЖСР удовлетворяет перечисленным выше требованиям к реакторам с "естественной безопасностью" и прежде всего ключевому требованию: отрицательные температурный и пустотный эффекты, что исключает тяжёлые аварии типа Чернобыльской. Топливный цикл жидкосолевого быстрого реактора (ЖСБР) существенно упрощается, поскольку он не требует изготовления топливных элементов из высокоактивного ОЯТ и становится возможной пристанционная переработка топлива, что в свою очередь снижает риск несанкционированного распространения делящихся материалов.

Кроме того, ЖСР рассматривают сейчас как один из перспективных способов уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов (в основном Am), накопленных за предыдущие 60 лет существования ЯЭ. Уже сегодня в мире накоплено ≈ 240 тыс. тонн ОЯТ, в которых содержится около 300 т ^{241}Am , и каждый год эта масса увеличивается примерно на 10 т за счёт распада $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ [17]. Для уничтожения этих отходов ЖСР приспособлен наилучшим образом: один ЖСР тепловой мощностью 1 ГВт, управляемый ускорителем, способен "сжечь" за год работы около 300 кг Am, т.е. основную часть долгоживущих отходов примерно от 30 тепловых реакторов равной мощности [18].

В настоящее время FLiNaK — единственная известная соль с такой высокой растворимостью фторидов

актинилов. Не исключено, что со временем найдут другие соли с таким же свойством, но, возможно, более приемлемые с экономической точки зрения, более удобные для переработки, обладающие меньшей коррозионной активностью и т.д., но главная идея ЖСБР при этом остаётся неизменной: *быстрый реактор с жидким топливом и U–Pu–топливным циклом*. На пути к реализации этой идеи предстоит преодолеть множество научных, технологических и инженерных проблем, но конечная цель того стоит.

Со времени появления первых статей Я.Б. Зельдовича и Ю.Б. Харитона прошло более 70 лет, за этот период многочисленные процессы, происходящие в ядерном реакторе, были досконально изучены, и сейчас любой студент знает о них больше, чем все авторы статей того времени (см. рис. 1). Тем не менее главные задачи ядерной энергетики до сих пор не решены: не построен безопасный и экономически приемлемый быстрый ядерный реактор, не разработан его замкнутый топливный цикл и не решена проблема обращения с радиоактивными отходами. И одна из причин этого — отсутствие в огромной армии инженеров и технологов атомной индустрии учёных такого калибра, как Я.Б. Зельдович и Э. Ферми. Создав атомное оружие, они навсегда покинули область знаний, связанную с ядерной энергетикой, и в ней постепенно стали превалировать не научные, а технологические и инженерные проблемы. При этом утрачено понимание того, что создание устойчивой ядерной энергетики представляет собой прежде всего *научную* проблему, по сложности (и значимости) многократно превышающую проблему создания ядерного оружия. И если в скором времени сложившаяся тенденция не изменится, то мы рискуем безвозвратно потерять возможность использовать ядерную энергию — единственный долгосрочный (на несколько сотен тысяч лет) источник энергии, без которой наша цивилизация окажется нежизнеспособной [19].

Список литературы

1. Зельдович Я Б, Харитон Ю Б "К вопросу о цепном распаде основного изотопа урана" *ЖЭТФ* **9** 1425 (1939)
2. Зельдович Я Б, Харитон Ю Б "О цепном распаде урана под действием медленных нейтронов" *ЖЭТФ* **10** 29 (1940)
3. Зельдович Я Б, Харитон Ю Б "Деление и цепной распад урана" *УФН* **23** 329 (1940)
4. Гуревич И И, Зельдович Я Б, Харитон Ю Б "Критические размеры и масса, необходимые для цепного деления ядер нейтронами", в сб. *Юлий Борисович Харитон. Путь длиною в век* (Ред.-сост. В И Гольданский, А Ю Семёнов, М Б Черненко) (М.: Эдиториал УРСС, 1999) с. 172
5. Segrè E *Enrico Fermi: Physicist* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1970) [Сегре Э Энрико Ферми — физик (М.: Мир, 1973)]
6. Понтекоров Б М, Покровский В Н *Энрико Ферми в воспоминаниях учеников и друзей* (М.: Наука, 1972)
7. MacPherson H G *Nucl. Sci. Eng.* **90** 374 (1985)
8. "Uranium 2011, Resources, Production and Demand", Joint Report (Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2012); <http://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2012/7059-uranium-2011.pdf>
9. Weinberg A M *The Second Nuclear Era: a New Start for Nuclear Power* (New York: Praeger, 1985)
10. Адамов Е О и др. *Атомная энергия* **112** 319 (2012) [Adamov E O et al. *Atom. Energy* **112** 391 (2012)]
11. Орлов В В и др. *Атомная энергия* **72** 317 (1992) [Orlov V V et al. *Atom. Energy* **72** 287 (1992)]
12. Пономарев Л И и др. *Атомная энергия* **115** 6 (2013) [Ponomarev L I et al. *Atom. Energy* **115** 5 (2013)]
13. Лизин А А и др. *Атомная энергия* **115** 11 (2013) [Lizin A A et al. *Atom. Energy* **115** 11 (2013)]
14. Воложин М В и др. *Атомная энергия* **115** 17 (2013) [Volozhin M V et al. *Atom. Energy* **115** 18 (2013)]
15. Лизин А А и др. *Атомная энергия* **115** 20 (2013) [Lizin A A et al. *Atom. Energy* **115** 22 (2013)]
16. Дегтярев А М, Пономарев Л И *Атомная энергия* **112** 367 (2012) [Degtyarev A M, Ponomarev L I *Atom. Energy* **112** 451 (2012)]
17. Дегтярев А М и др. *Атомная энергия* **114** 183 (2013) [Degtyarev A M et al. *Atom. Energy* **114** 225 (2013)]
18. "2010 Key World Energy Statistics", Report (Paris: IEA, 2010); http://ua-energy.org/upload/files/key_stats_2010.pdf
19. Орлов В В, Пономарев Л И *Природа* (3) 4 (2011)

Ya.B. Zeldovich and nuclear power

L.I. Ponomarev

A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials,
ul. Rogova 5a, 123098 Moscow, Russian Federation
E-mail: leonidp2008@mail.ru

The idea of a homogeneous nuclear reactor, first considered by Ya.B. Zeldovich and Yu.B. Khariton in 1939, has since had its ups and downs and is now re-emerging, enriched with knowledge and experience accumulated over the years. One of the current versions of the idea, the molten salt fast reactor with a U–Pu cycle, is presented in this paper.

PACS numbers: **01.65. + g**, **28.41. – i**, **28.50. – k**

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201403a.0227

Bibliography — 19 references

Received 8 October 2013, revised 11 December 2013

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **184** (3) 227–230 (2014)

Physics – Uspekhi **57** (3) (2014)