

В.Г. Ильину, С.В. Глушкову и другим сотрудникам НИТИ за помощь в проведении γ -спектрометрического, дозиметрического и радиохимического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов Б.В., Кожин Е.Г., Трушков Н.П. и др. Оптимизация технологии и опытно-промышленная переработка жидких радиоактивных отходов Тихоокеанского флота. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 1, с. 27—32.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-99. М., Госатомнадзор, 1999.
3. Давыдов В.И., Костин В.В., Славин Л.Н. и др. Установки отверждения жидких отходов низкого и среднего уровня активности. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 6, с. 429—433.
4. Шендрик О.Р., Криворучко А.П., Пономарев М.И. Очистка природных вод для нужд теплоэнергетики и электронной промышленности. — Химия и технология воды, 1991, т. 13, № 4, с. 325—337.
5. Зайцева А.Ф. Радиационная гигиена. М., 1962.
6. Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974.
7. Москвин Л.Н., Гумеров М.Ф., Ефимов А.А. и др. Методы химического и радиохимического контроля в атомной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
8. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия, 1978.
9. Yermachov V.N., Oleyunik M.S. Technology for treatment of lowactivity liquid radwastes from nuclear power installation, using ultrafiltration, reverse osmosis, ion exchange and cementation. — In: Intern. Conf. Radioactive Waste Management: Commitment to the Future Environment. V. II, Antwerpen, Belgium, Oct. 10—14, 1999, p. 271—275.
10. Huber S.A. Differences in the composition of organic impurities in ground and surface waters: consequences for the preparation of boiler feed water. — In: Intern. Conf. «Water Chemistry in Nuclear Reactors Systems». Avignon, France, April 2002, ref. 112.
11. Правила охраны от загрязнений прибрежных вод морей. М.: Наука, 1984.
12. Епимахов В.Н., Олейник М.С., Алешин А.М., Смирнов В.Д. Отверждение радиоактивных концентратов морских солей на модульной установке цементирования. — В сб.: 4-я Межд. конф. по морским интеллектуальным технологиям МОРИНТЕХ-2001. СПб, 20—22 сентября 2001 г., с. 258—260.
13. Епимахов В.Н., Олейник М.С., Алешин А.М. Совершенствование технологии спецводоочистки Чернобыльской АЭС при проведении работ по снятию с эксплуатации. — В сб.: Научные и технические аспекты Чернобыля. Киев: Политехника, 2002, вып. 4, с. 428—436.
14. Епимахов В.Н., Панкина Е.Б., Олейник М.С. и др. Дезактивация технологических водных сред ЯЭУ цеолитами компании «Экологическая продукция». Тезисы докл. 3-й Межд. конф. «Экология и развитие Северо-Запада России». СПб—Ладоса—Онега, 1998, с. 330—331.

Поступила в Редакцию 14.10.04

УДК 621.384

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ВЧ-СИСТЕМ В УСКОРИТЕЛЯХ С НЕБОЛЬШОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Васильев А.А., Громов А.М., Солодухов Г.В. (ИЯИ РАН)

В настоящее время накоплен большой опыт разработки и эксплуатации ускорителей со сверхпроводящими ускоряющими системами [1—5]. В общей сложности в мире к 2004 г. сооружено более одного километра ускоряющих сверхпроводящих структур. В Ок-Риджской национальной лаборатории (США) строится мощный нейтронный источник на основе сверхпроводящего сильноточного линей-

ного ускорителя протонов энергией 1 ГэВ. Подготовлен проект удвоения энергии (до 12 ГэВ) ускорителя SEBAF (США).

Следует отметить, что современные сверхпроводящие ускоряющие системы разрабатывались, в основном, для установок со сверхвысокой энергией пучка от сотен МэВ до ТэВ и строились по модульному принципу. В настоящей работе приведены некоторые данные успешного применения сверхпроводящих ускоряющих ВЧ-систем для установок большой энергии и ускорителей со встречными пучками, которые могут быть полезны и при создании сверхпроводящих систем для небольших установок.

Комплексы, использующие ВЧ-сверхпроводящие ускоряющие системы. Разработка, создание и эксплуатация сверхпроводящих ускоряющих систем электронного ускорителя-рециркулятора SEBAF, ускорителя со встречными пучками LEP (ЦЕРН) и других, меньших по масштабу, в США и Японии связаны с успехами в технике ВЧ-сверхпроводимости, достигнутыми в последние годы. Если действующие в настоящее время сверхпроводящие структуры обеспечивают среднюю напряженность ВЧ-поля ~ 7 МВ/м, то в разработанных в последнее время серийных резонаторах достигнуто 25 МВ/м, в лабораторных образцах — до 40 МВ/м, что близко к теоретическому пределу 50 МВ/м для используемого в этих резонаторах ниобия [2].

Сверхпроводящая ВЧ-ускоряющая система LEP [6] обеспечила получение энергии сталкивающихся пучков 209 ГэВ. В ней было установлено 288 резонаторов частотой 350 МГц, длиной 1,7 м. Среднее ускоряющее поле достигало 7,2 МВ/м. Суммарный прирост энергии при однократном ускорении составил 3600 МэВ. Резонаторы изготовлены по разработанной в ЦЕРНе технологии нанесения тонкой пленки ниобия на внутренние поверхности медных форм. SEBAF сооружен для получения пучка ускоренных до энергии 4 ГэВ электронов в непрерывном режиме. В дальнейшем его параметры были улучшены и получен пучок электронов энергией 5,8 ГэВ. Сверхпроводящая ускоряющая система SEBAF [7] выполнена из 338 полуметровых сборок, каждая из которых включает пять резонаторов, работающих на частоте ~ 1500 МГц. Первоначально сборки обеспечивали ускоряющее поле 5 МВ/м, которое затем было повышено до 6,9 МВ/м. В настоящее время принято решение о дальнейшем увеличении энергии ускорителя до 12 ГэВ.

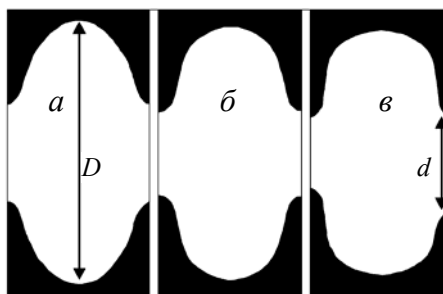
Активная международная деятельность уже длительное время направлена на создание сверхпроводящего электрон-позитронного ускорителя TESLA со встречными пучками энергией, превышающей 1 ТэВ. Для этого важно существенно снизить стоимость единицы длины ускоряющей структуры за счет увеличения градиента ускоряющего напряжения, улучшения и упрощения конструкции и добиться ускоряющего поля более 25 МВ/м. В настоящее время новой целью является достижение ускоряющего поля 35 МВ/м. Это потребовало тщательного изучения теоретических вопросов, связанных с работой резонаторов в критических режимах, и существенного улучшения подготовки резонаторов к работе в таких условиях.

В настоящее время в США создается мощный импульсный источник нейтронов SNS на основе протонного линейного сверхпроводящего ускорителя со средней мощностью ускоренного пучка протонов 2 МВт [8]. Его сверхпроводящая часть позволяет ускорить протоны от 200 до 1000 МэВ. В сверхпроводящей части будут применяться резонаторы, работающие при скорости частиц как близкой к скорости

света, так и существенно меньше ее ($\beta \sim 0,6$). Применение сверхпроводящих элементов позволит в несколько раз сократить длину ускорителя, уменьшить мощность ВЧ-ускоряющей системы, а также эксплуатационные расходы за счет существенного снижения тепловых потерь в стенках резонаторов. Уменьшение потерь оказывается в несколько раз больше дополнительной мощности, потребляемой рефрижераторной системой.

Ускорители, работающие при комнатной температуре, имеют мощную и соответственно дорогую ускоряющую ВЧ-систему, причем дорогую не только при сооружении, но и в эксплуатации. Сверхпроводящая ускоряющая ВЧ-система не только уменьшит необходимую мощность питающих ее генераторов, но и, как следствие, расход электроэнергии при эксплуатации. Значительно сократятся также продольные геометрические размеры ускоряющих структур, работающих в непрерывном режиме. Все это позволит сделать всю ускорительную установку более экономичной и компактной. Несовершенство промышленных криогенных систем до последнего времени препятствовало применению сверхпроводящих систем в ускорительной технике. Появление надежных высокопроизводительных автоматизированных ожижителей с замкнутым циклом позволило упростить и удешевить эксплуатацию этой специфической техники.

Основные параметры резонаторов действующих комплексов со сверхпроводящими ВЧ-ускорительными системами. Рассмотрим параметры современного сверхпроводящего резонатора, разработанного для второй очереди СЕБАФ (см. рисунок) [9]. Для получения энергии ускоренного пучка 12 ГэВ вместо 6 ГэВ, при которой установка эксплуатируется в настоящее время, необходимо достичь ускоряющего поля в сверхпроводящих секциях новых криогенных модулей ~ 18 МВ/м. Кроме того, для уменьшения количества и, следовательно, стоимости потребляемой рефрижераторной установкой электроэнергии следует минимизировать потери. Основные параметры резонаторов с геометрическим фактором G следующие [10]:



Поперечное сечение исходного резонатора (а), оптимизированного по максимальному ускоряющему полю (б) и минимальным ВЧ-потерям (в) [9]

	Исходный вариант	Оптимизированный	
		на максимальный градиент	на минимум потерь
Диаметр по экватору D , мм . . .	187	180,5	174
Диаметр пролетного отверстия d , мм . . .	70	61,4	53
Коэффициент связи, % . . .	3,29	1,72	1,49
$E_{\text{макс}}/E_{\text{уск}}$. . .	2,56	1,89	2,17
$B_{\text{макс}}/E_{\text{уск}}$, мТл/(МВ/м) . . .	4,56	4,26	3,74
R/Q . . .	96,5	111,9	128,8
G . . .	273,8	265,5	280,3
R/QG . . .	26 422	29 709	36 103

Параметры сборок из семи резонаторов трех типов с $E_{\text{уск}} = 17,7$ МВ/м таковы [10]:

$R/Q \dots$	678	773	877
$Q_0, 10^9 \dots$	8	7,8	8,3
Динамические потери ВЧ-мощности при 2 К, Вт . . .	28	25	21
$E_{\text{макс}}, \text{МВ/м} \dots$	45	33	38
$B_{\text{макс}}, \text{мТл} \dots$	81	75	66

Так как после обработки поверхности сверхпроводящего резонатора предельно допустимое ускоряющее поле определяется, в основном, электронной эмиссией, для повышения ускоряющего поля необходимо уменьшить отношение $E_{\text{макс}}/E_{\text{уск}}$, где числитель и знаменатель означают соответственно максимальное и ускоряющее электрическое поле в резонаторе. Для уменьшения потерь $P_{\text{рез}}$ в стенках резонатора длиной $L_{\text{рез}}$, которые определяются по формуле

$$P_{\text{рез}} = R_{\text{пов}}(E_{\text{уск}}L_{\text{рез}})^2/(GR/Q),$$

необходимо при заданных $E_{\text{уск}}$ и поверхностном сопротивлении $R_{\text{пов}}$, увеличивать произведение геометрического фактора G и характеристического импеданса R/Q . Тепловые потери в стенках оптимизированного резонатора на 35% меньше, чем в исходных резонаторах.

Продольные размеры новых криогенных модулей были приняты равными размерам действующих, количество резонаторных сборок было оставлено прежним. Для увеличения ускоряющего напряжения [9, 11] до проектных 108 МВ приняты следующие параметры сборки: ускоряющее поле 19 МВ/м, число резонаторов 7, длина 70 см при одновременном уменьшении расстояния между ними. В действующих сборках резонаторов было пять. Коэффициент связи k_c модернизированных резонаторов уменьшился, но остался в допустимых пределах. Значения максимальной индукции и ее отношения к ускоряющему полю существенны для оценки вероятности перехода резонатора в нормальное состояние из-за перегрева ВЧ-полем его поверхности вблизи дефектов. Меньшие магнитные поля, характерные для модернизированных резонаторов, являются предпочтительными.

Подавление высших мод. Для ВЧ-сверхпроводящих резонаторов, которые в силу высокой добротности рассчитаны на работу в постоянном или квазипостоянном режиме, большой проблемой является образование высших мод, которые создают поперечную раскачку пучка и нарушают режим ускорения. Для подавления этих мод используют коаксиальные или волноводные соединения [12]. Расчеты добротности резонаторов для паразитных мод позволяют оптимизировать условия их подавления. Большой опыт конструирования подобных устройств накоплен на СЕБАФ и европейском ускорителе TESLA.

Нагрузка на криогенную систему. Как показывают оценки, при среднем ускоряющем поле около 19 МВ/м тепловые потери на одну сборку из семи резонаторов будут составлять около 37 Вт при 2 К и около 50 Вт при 50 К (см. таблицу). При этом обеспечивается ускорение примерно 13 МэВ. Мощность возбуждения, необходимая для получения требуемого ускоряющего поля, пренебрежимо мала по сравнению со структурой, работающей при комнатной температуре. Обычно это ~200 Вт/м для получения градиента 25 МВ/м и ~25 МВт/м (для непрерывного режима) на обычных резонаторах [2].

Динамические и статические потери тепла

Нагрузка	Тепловая нагрузка, Вт	
	2 К	50 К
Статическая	<25	180 — экраны, 56 — соединители
Динамическая (для 8 сборок из 7 резонаторов каждая)	240	108
Предельно допустимая	300	400

Сверхпроводящие резонаторы, несмотря на затраты электроэнергии на рефрижератор, позволяют в несколько раз уменьшить потребление электроэнергии ВЧ-ускоряющей системой. Так, сверхпроводящие структуры LEP потребляют в 5 раз меньше энергии по сравнению с обычными [1]. Это можно определить, сравнивая к.п.д. ВЧ-системы обычных ($\eta_{\text{норм}}$) и сверхпроводящих резонаторов ($\eta_{\text{с.п}}$) с учетом рефрижератора:

$$\eta_{\text{норм}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{п}} + P_{\text{ВЧ}}} = (1 + R_0 / R)^{-1}.$$

Здесь $P_{\text{п}}$ — мощность, передаваемая резонатором в пучок; $P_{\text{ВЧ}}$ — потери в резонаторе при наличии ВЧ-поля; R_0 — формально введенное сопротивление, определяемое проектными значениями напряжения на резонаторе и тока пучка; R — шунтовое сопротивление резонатора; $P_{\text{п}} = E_{\text{уск}} I_{\text{п}}$; $R = E_{\text{уск}}^2 / P_{\text{ВЧ}}$; $R_0 = E_{\text{уск}} / I_{\text{п}}$.

Здесь предполагается также, что напряжение на резонаторе синфазно с током пучка. Например, для медных резонаторов LEP [1] ускоряющее напряжение $E_{\text{уск}} = 3$ МВ, ток пучка $I_{\text{п}} = 6$ мА, $R = 86$ МОм, $R_0 = 500$ МОм, что дает $\eta_{\text{норм}} = \sim 15\%$.

Для расчета эффективности передачи ВЧ-энергии в пучок сверхпроводящими резонаторами $\eta_{\text{с.п}}$ необходимо учесть затраты энергии в рефрижераторе. Эти затраты энергии необходимы для поддержания резонаторов при заданной низкой температуре при наличии ВЧ-потерь $P_{\text{ВЧ}}$ в стенках и статических потерь $P_{\text{стат}}$ из-за теплопритоков через стенки криостата и другие подсоединенные к резонаторам устройства (поглотители энергии высших мод, вводы ВЧ-энергии и др):

$$\eta_{\text{с.п}} = P_{\text{п}} [P_{\text{п}} + (P_{\text{ВЧ}} + P_{\text{стат}}) / k_{\text{эф}}]^{-1} = [1 + (P_{\text{ВЧ}} + P_{\text{стат}}) / P_{\text{п}} k_{\text{эф}}]^{-1}.$$

Здесь $k_{\text{эф}}$ — эффективность рефрижератора, которая является произведением термодинамической эффективности цикла Карно и его реальной эффективности. Для современных рефрижераторных установок $k_{\text{эф}} \sim 0,45\%$ [1]. Для параметров сверхпроводящих резонаторов и криостата LEP [1] $P_{\text{ВЧ}} = 50$ Вт, $P_{\text{п}} = 50$ кВт и $P_{\text{стат}} = 25$ Вт, $\eta_{\text{с.п}} \sim 75\%$, что в 5 раз выше, чем в обычном варианте. При этом и ускоряющее поле сверхпроводящих резонаторов (5 МВ/м) существенно выше. Если привести в рассматриваемом случае оба типа резонаторов к одинаковым градиентам, то разница эффективности будет еще больше. Для сверхпроводящих резонаторов при малых градиентах загрузка рефрижератора будет определяться, в основном, статическими теплопритоками к элементам системы, находящимся при низкой температуре.

Проектирование сверхпроводящих резонаторов совместно с другими элементами криогенного модуля. Для определения высокочастотных и термических

характеристик необходимо рассматривать сверхпроводящую сборку резонаторов вместе с другими устройствами, входящими в криогенный модуль [10, 13—17], — соединениями для подвода высокочастотной мощности и подавления высших мод [12], устройствами регулирования резонансной частоты, вакуумной камерой для прохождения ускоряемого пучка, криостатом с коммуникациями для подвода и отвода охлаждающего гелия с устройствами фиксации ускоряющей системы относительно орбиты ускоряемых частиц и др. Для некоторых устройств, например, для резонатора и узла ввода ВЧ-мощности разработаны программы расчета. В некоторых случаях необходимо создавать экспериментальные модели.

Ускорители на малую энергию. Как уже указывалось, криогенные сверхпроводящие системы ускорителей на большую энергию строятся по модульному принципу. В связи с этим полученные результаты представляют интерес и для сравнительно небольших по энергии ускорительных установок, проектируемых для работы в непрерывном режиме. Рассмотрим в качестве примера микротрон с непрерывным пучком энергией до 200 МэВ и током до 100 мкА [18, 19]. Для ускорителей такого класса достаточна сверхпроводящая ускоряющая система, обеспечивающая прирост энергии около 10 МэВ при длине системы ускоряющих резонаторов $\sim 1\text{—}1,5$ м. Требуемые ускоряющие ВЧ-поля реально достигнуты. Работы по дальнейшему улучшению формы резонаторов позволили достичь ускоряющего поля 46 МВ/м [20].

С учетом малых продольных размеров ускоряющего модуля возможно применение двух сборок из семи резонаторов. При этом необходимое ускоряющее поле и суммарные динамические потери уменьшатся в 2 раза. Это повысит надежность системы и уменьшит нагрузку на рефрижератор за счет допустимого увеличения длины ускоряющей системы. Можно предусмотреть питание каждой сборки резонаторов от отдельного ВЧ-генератора. Это повысит надежность всего комплекса, который сможет функционировать при пониженном токе пучка в случае отказа или ремонта одного из генераторов и связанных с ним элементов.

Для компенсации динамических потерь в двух сборках, работающих при половинном градиенте, потребуется ~ 15 Вт при 2 К. Кроме того, необходимо охлаждать систему подводки гелия, тепловые экраны и вводы мощности. Если с запасом принять суммарные потери 40 Вт и усредненную эффективность рефрижератора ~ 500 Вт при комнатной температуре на 1 Вт при температуре жидкого гелия, то потребляемая им мощность от сети для ускорителя на 200 МэВ составит всего около 20 кВт.

Изложенное указывает на перспективность применения ВЧ-сверхпроводящих ускоряющих систем для ускорителей в широком диапазоне энергии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Weingarten W.** Superconducting cavities — basics. — In: Proc. of CAS — CERN Accelerator School: Superconductivity in Particle Accelerators, 1996, v. 96-03, p. 1—26.
2. **Padamsee H., Knobloch J., Hays T.** RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley and Sons, 1998.
3. **Padamsee H.** Superconducting RF-new directions. — In: Proc. of the PAC'2001, p. 468—472.
4. **Edwards H.** RF Superconductivity: enabling technology for the future. — In: Proc. of the PAC'2003, p. 447—451.
5. **Диденко А.Н.** Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. М.: Советское радио, 1973. 255 с.

6. Geschonke G., Brown P., Brunner O. e.a. Ultimate performance of the LEP RF system. — In: Proc. of the PAC'2001, p. 1059—1061.
7. Reece C., Benesch J., Preble J. Refining and maintaining the optimal performance of the CEBAF SRF system. — Ibid., p. 1186—1188.
8. Wei J. The spallation neutron source project physical challenges. — In: Proc. of the EPAC'2002, p. 1064—1066.
9. Sekutowicz J., Ciovati G., Kneisel P. e.a. Cavities for JLAB's 12 GeV upgrade. — In: Proc. of the PAC'2003, p. 1395—1397.
10. Joshi C., Bent B. A magnetostrictive tuning mechanism for SRF cavities. — In: Proc. of the PAC'1999, p. 931—933.
11. Delayen J. Upgrade of the CEBAF acceleration system. — Ibid., p. 3498—3500.
12. Sekutowicz J., Gössel A., Kreps G., Zheng S. Active HOM excitation in the first prototypes of superstructure. — In: Proc. of the PAC'2003, p. 1392—1395.
13. Delayen J., Doolittle L., Feldl E. e.a. Cryomodule development for the CEBAF upgrade. — In: Proc. of the PAC'1999, p. 934—936.
14. Campisi I.E. State of the art power couplers for superconducting RF cavities. — In: Proc. of the EPAC'2002, p. 144—148.
15. Delayen J.R., Doolittle L., Feldl E. e.a. Frequency tuning of the CEBAF upgrade cavities. — In: Proc. of the PAC'1999, p. 928—930.
16. Knobloch J., Anders W., Xiang Y. Cryogenic considerations for CW operation of TESLA-type superconducting cavity modules for the BESSY FEL. — In: Proc. of the EPAC'2004, p. 976—978.
17. Krawczyk F., Chan K., Gentzlinger R. e.a. An integrated design for a $\beta = 0.175$ spoke resonator and associated power coupler. — In: Proc. of the EPAC'2002, p. 272—274.
18. Васильев А.А., Громов А.М., Солодухов Г.В. Разрезной микротрон-рециркулятор со сверхпроводящими СВЧ-резонаторами. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 6, с. 457—461.
19. Алимов А.С., Гудков К.А., Ермаков Д.Е. и др. Состояние работ по сооружению разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 175 МэВ Центра ЭМИЯ. — В кн.: 14 сов. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т. 4, с. 168—176.
20. CERN Courier, 2005, v. 45, № 5, p. 32.

Поступила в Редакцию 22.06.05

УДК 621.039.516

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТХОДОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Селиверстов В.В. (ГНЦ РФ — ИТЭФ)

Одно из решений проблемы обращения с долгоживущими трансурановыми элементами отходов, обсуждаемое в последние годы как в нашей стране, так и за рубежом, — их уничтожение путем перевода в продукты деления при облучении в критических или подкритических размножающих системах [1—4]. Высказывают и обсуждают различные, порой диаметрально противоположные точки зрения относительно наиболее эффективных типов систем для уничтожения отходов. В частности, должны ли это быть системы с быстрым или тепловым спектром. Приводимые в защиту той или иной точки зрения аргументы несколько не убеждают оппонентов, и единого мнения до сих пор не выработано. При этом сторонники противоположных подходов оказываются каждый по-своему правы.

По мнению автора, такая ситуация сложилась из-за отсутствия четко сформулированной задачи уничтожения отходов, что и приводит к неоднозначности предлагаемых решений. В настоящей статье изложены некоторые формулировки и по-