

ся с данными о свойствах Fm^{250} [10], который образуется при распаде изотопа 102^{254} . Из распределения Fm^{250} на двух детекторах, разделенных при накоплении вторичных продуктов временными интервалами от 26 до 200 сек, видно, что время жизни первичного продукта (изотопа 102^{254}) значительно больше 3 сек.

Выход Fm^{250} среди дочерних продуктов соответствует по интенсивности выходу первичной α -активности с энергией $8,10 \pm 0,05 \text{ Мэв}$ и не может быть обусловлен только распадом изотопа, испускающего в первичных продуктах α -частицы с энергией больше $8,10 \text{ Мэв}$. В контрольных опытах по облучению этой же самой мишени Am^{243} ионами N^{14} в интервале энергий 80—90 Мэв выход излучателя с энергией α -частиц $8,10 \pm 0,05 \text{ Мэв}$ существенно уменьшился, при этом α -активность с энергией 7,45 Мэв в спектре дочерних продуктов отсутствовала. Это указывает на то, что только часть наблюдавшегося эффекта можно объяснить загрязнением мишени. Таким образом, полученные нами экспериментальные данные находятся в противоречии с данными А. Гиорсо и др. [4,6] о свойствах изотопа 102^{254} ($T_{1/2} = 3 \text{ сек}$, $E_{\alpha} = 8,3 \text{ Мэв}$). Согласно нашим данным, период полураспада изотопа 102^{254} находится в интервале 20—50 сек, а энергия α -частиц равна $8,10 \pm 0,05 \text{ Мэв}$. Полученные нами данные о свойствах изотопа 102^{254} достаточно хорошо согласуются с результатами работы [11], в которой период полураспада изотопа 102^{254} тщательно исследовался по дочерним ядрам химически выделенного Fm^{250} .

В связи с тем что данные о свойствах изотопа 102^{254} важны для предсказания свойств новых изотопов трансурановых элементов, необходимы дальнейшие исследования свойств этого изотопа.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить коллектив, работающий на ускорителе, во главе с А. Ф. Линевым, И. А. Шелаевым и В. С. Алфеевым за обеспечение четкой работы циклотрона, К. А. Гаврилова за изготовление мишеней, устойчивых под высокоинтенсивными пучками, и В. А. Чугреева за проведение конструкторских работ. Мы выражаем благодарность д-ру физ.-матем. наук И. Г. Гвердцители, предоставившему в наше распоряжение изотоп N^{15} , В. И. Кузнецову, А. Г. Смирнову-Аверину и А. Г. Козлову, обеспечившим получение Am^{243} для мишеней. Авторы благодарят также А. Г. Белова, В. И. Илющенко и В. М. Николаева за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 15/XII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. Viola, G. Seaborg. Nuclear Systematics of the Heavy Elements. Energetics and Masses (в печати).
2. V. Viola, G. Seaborg. Nuclear Systematics of the Heavy Elements Lifetimes for Alpha, Beta and Spontaneous Fission Decay (в печати).
3. V. Viola, B. Wilkins. Fission Barriers and Half-lives of the Trans-Radium Elements (в печати).
4. A. Ghiorso et al. Phys. Rev. Letters, 1, 18 (1958).
5. R. Macfarlane, R. Griffioen. Nucl. Instrum. and Methods, 24, 461 (1963).
6. А. Гиорсо. «Атомная энергия», 7, 338 (1959).
7. В. Л. Михеев. Препринт ОИЯИ 2291. Дубна, 1965.
8. Э. Г. Имаев, Б. В. Фефилов, Л. П. Челноков. Препринт ОИЯИ 2355. Дубна, 1965.
9. R. Griffioen, R. Macfarlane. Phys. Rev., 133, 6B, B1373 (1964).
10. D. Strominger, J. Hollander, G. Seaborg. Rev. Mod. Phys., 30, II, 585 (1958).
11. Е. Д. Донец, В. А. Щеголев, В. А. Ермаков. Препринт ОИЯИ Р-2471. Дубна, 1965.

Атомная энергия и опреснение соленых вод*

Ю. И. Корякин, А. А. Логинов

УДК 621.039.576:621.039.577

За последние годы в связи с успехами энергетического реакторостроения во многих странах мира возник большой интерес к вопросам использования ядерных реакторов для покрытия быстро увеличивающегося дефицита пресной воды. Советский Союз (точнее ряд его рай-

онов) относится к большой группе стран, испытывающих недостаток в пресной воде. Частичным отражением заинтересованности СССР в решении этой проблемы являются доклады Советского Союза, представленные на Первый международный симпозиум по опреснению воды. Был представлен 21 доклад по различным аспектам опреснения соленых и солоноватых вод.

* Обзор докладов, представленных СССР на Первый международный симпозиум по опреснению воды (Вашингтон, 3—9 октября 1965 г.).

В задачу данной статьи входит в основном освещение затронутых в докладах вопросов экономики, техники и теплотехники использования ядерных реакторов в опреснительных установках, работающих по методу дистилляции. Этот метод, включающий в себя два способа опреснения соленых вод — выпаривание и мгновенное вскипание, — наиболее соответствует специфике использования ядерных реакторов в атомных опреснительных установках.

В настоящем обзоре в общих чертах изложены также вопросы технологии получения пресной воды в собственно опреснительных устройствах и описаны методы получения пресной воды из соленых и солоноватых вод, не связанные с дистилляцией (например, электродиализ и ионный обмен).

Вопросы экономики

Проблемы экономики применения ядерных реакторов для опреснительных установок привлекают сейчас к себе пристальное внимание. Можно с уверенностью сказать, что возможность технического осуществления ядерной опреснительной установки на основе использования любого из проверенных в эксплуатации типов энергетических реакторов не вызывает сомнений. Реактор в ядерной опреснительной установке используется как источник тепла для дистилляции воды с повышенной минерализацией. В двухцелевых установках выработка дистиллята сочетается с одновременной выработкой электроэнергии, так как потенциал получаемого тепла достаточен для производства пара турбоэнергетических параметров.

Сложнее обстоит дело с экономикой ядерных двухцелевых опреснительных установок. Специфической особенностью таких установок является наличие одновременно двух видов продукции — дистиллята и электроэнергии. Поскольку распределение издержек производства на эти два вида продукции может быть осуществлено различными путями, возникают предпосылки для использования различных подходов и методик определения экономических показателей установок.

Для выявления условий экономической конкурентоспособности двухцелевых ядерных опреснительных установок наиболее приемлемым следует считать такой метод расчета их технико-экономических показателей, который позволил бы сравнивать установки с различными типами ядерных реакторов с обычными способами энерго- и водообеспечения с учетом предполагаемого

места строительства, но без учета конъюнктурных особенностей данного района. Эти обстоятельства являются главными при изучении экономики и проектировании двухцелевой установки для условий СССР, где оба вида продукции двухцелевой установки одинаково важны с народнохозяйственной точки зрения. Такая методика изложена в работе [1].

Сущность методики заключается в определении себестоимости тепла греющего пара на ядерных двухцелевых установках из условия недовыработки электроэнергии рассматриваемым ядерным реактором по сравнению с его использованием на конденсационной АЭС. Ежегодные издержки производства, приходящиеся на недовыработку электроэнергии, рассматриваются как издержки производства тепла греющего пара, расходуемого для дистилляции воды. В таком случае ежегодные издержки производства для двухцелевой установки складываются из издержек производства электроэнергии и дистиллята. Издержки производства электроэнергии определяются, так же как и для конденсационной АЭС, по себестоимости ее электроэнергии, но с учетом недовыработки электроэнергии и незначительного сокращения затрат, связанного с исключением некоторого оборудования, характерного только для конденсационной АЭС. Издержки производства дистиллята определяются как сумма издержек производства собственно опреснительной части установки и издержек производства тепла греющего пара.

Если учесть, что ядерный энергоисточник в сочетании с опреснительной установкой представляет собой сложный инженерный комплекс, характеризующийся множеством теплофизических, физических и технических показателей, которые прямо или косвенно влияют на себестоимость вырабатываемой продукции, то становится очевидным, что технико-экономическая оптимизация ядерной двухцелевой установки невозможна без привлечения электронно-вычислительной техники.

Методическому подходу к решению этой задачи из трех типов отечественных реакторов — Белоярской, Ново-Воронежской и Шевченковской АЭС — и двух тепловых схем опреснительной части установок — с вертикальными выпарными аппаратами и с аппаратами мгновенного вскипания — посвящена работа [2]. Описанный метод позволяет проводить оптимизацию и сравнение в широком диапазоне изменения технических характеристик как реакторной, так и опреснительной части установок.

Зависимость себестоимости электроэнергии C_a и капиталовложений K от тепловой мощности реактора Q_p и производительности по дистилляту G

Таблица 1

$Q_p = 200 \div 2500 \text{ Мвт}$			$G = (0,1 \div 30) \cdot 10^3 \text{ т/ч}$	
Белоярская АЭС	Ново-Воронежская АЭС	Шевченковская АЭС	7-ступенчатые аппараты (выпарка)	30-ступенчатые аппараты (вскипание)
$C_a = 0,457 + 3,8 \exp \times (-0,418 \cdot 10^{-2} Q_p)$ $\text{коп/квт} \cdot \text{ч};$ $K = 87 - 45 \exp \times (-1,195 \cdot 10^{-3} Q_p)$ млн. руб.	$C_a = 0,457 + 3,8 \exp \times (-0,253 \cdot 10^{-2} Q_p)$ $\text{коп/квт} \cdot \text{ч};$ $K = 87 - 45 \exp \times (-0,73 \cdot 10^{-3} Q_p)$ млн. руб.	$C_a = 3442 \times Q_p^{-1,272}$ $\text{коп/квт} \cdot \text{ч};$ $K = 107 - 42,5 \exp \times (-0,982 \cdot 10^{-3} Q_p)$ млн. руб.	$K_{уд} = 1800 + 44,75 \cdot 10^3 G^{-0,634}$ руб/т/ч	$K_{уд} = 2240 + 248,2 \times 10^3 G^{-0,699}$ руб/т/ч

При этом рассматриваются отдельно капиталовложения в «ядерную» (включая энергетический контур) и опреснительную части установок. При таком подходе к оценке капиталовложений в максимальной степени могут быть использованы имеющиеся данные по ядерной энерге-

тике, а также учтены тенденции и особенности экономики, наблюдающиеся при значительном увеличении единичной мощности реакторов по сравнению с существующими.

На основании обработки данных работ [3, 4] получены (табл. 1) приближенные зависимости капиталовложений в ядерную часть опреснительных установок от тепловой мощности реакторов, а также зависимости капиталовложений в опреснительную часть установок от производительности по дистилляту при использовании 7-ступенчатых вертикальных выпарных аппаратов и 30-ступенчатых аппаратов мгновенного вскипания. В этой же таблице приведены зависимости себестоимости электроэнергии для конденсационных АЭС с упомянутыми реакторами от тепловой мощности реакторов при коэффициенте использования установленной мощности 0,8.

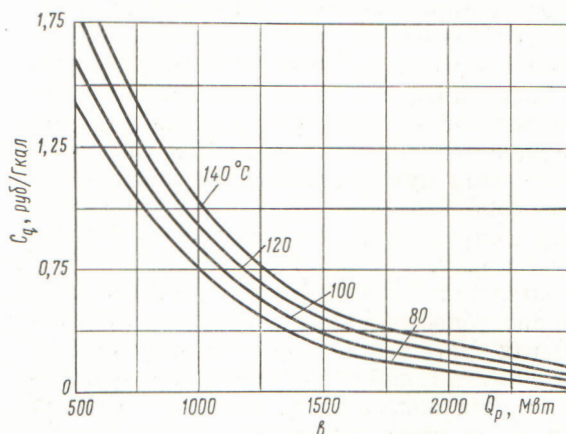
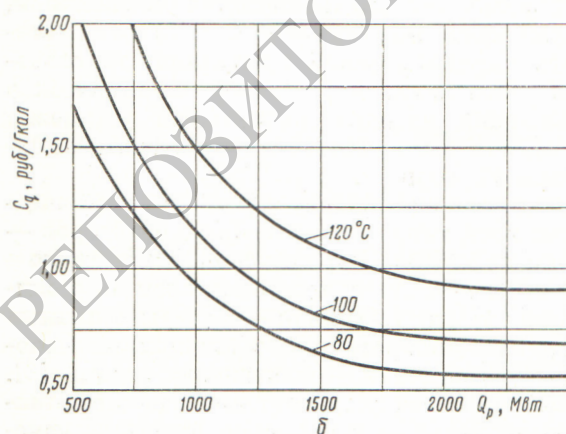
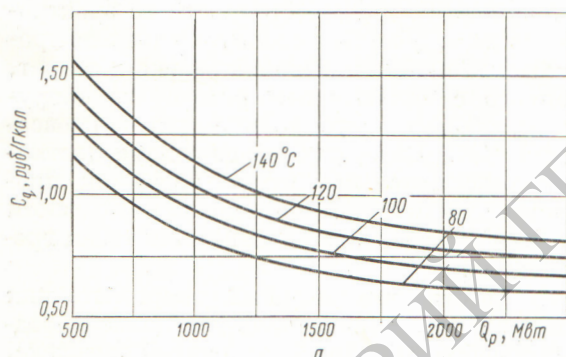


Рис. 1. Зависимость стоимости тепла C_q греющего пара от тепловой мощности реактора Q_p :

а — реактор Белоярского типа; б — реактор Ново-Воронежского типа; в — реактор Шевченковского типа.

Зависимости стоимости тепла греющего пара от тепловой мощности реактора для различных значений температуры греющего пара приведены на рис. 1. Из рисунка следует, что для реактора Ново-Воронежского типа стоимость тепла сильно зависит как от тепловой мощности реактора (до ~ 2000 Мвт), так и от температуры греющего пара, в то время как для реактора Белоярского типа эти зависимости выражены менее резко. Это объясняется наличием более высоких параметров пара на реакторах Белоярского типа и, следовательно, меньшим влиянием относительной недовыработки электроэнергии. Для реактора Шевченковского типа стоимость тепла греющего пара резко зависит от тепловой мощности реактора и достигает меньших значений по сравнению с другими типами реакторов.

Предварительные обобщенные результаты анализа показателей двухцелевых установок приведены в табл. 2.

Анализ теплотехнических и экономических показателей проведен также в работах [4—7]. Основное внимание здесь уделено оценке термоопреснительной части двухцелевых установок; ядерная часть почти не рассматривается. Так, в работе [4] анализируются три схемы опреснения: 1) многоступенчатое мгновенное испарение с поверхностной конденсацией; 2) многоступенчатое поверхностное испарение с бесповерхностной (смешивающей) конденсацией; 3) проточная последовательная многокорпусная выпарка. По всем трем схемам получены зависимости стоимости дистиллята от числа ступеней установки для различных заданных значений стоимости тепла греющего пара, а также зависимости удельных капитальных затрат на сооружение установок (отнесенные к производительности $1 \text{ м}^3/\text{ч}$) от числа ступеней при различных фиксированных значениях других определяющих параметров.

Методика определения оптимальной тепловой экономичности двухцелевых ядерных установок с реактором Ново-Воронежского типа изложена в работе [5]. Приведены также результаты анализа при температуре теплоносителя реактора Ново-Воронежской АЭС ($275\text{—}280^\circ\text{C}$).

В работе [6] получены зависимости, позволяющие определять основные технические показатели термоопреснительных установок, изложена методика технико-экономических расчетов по определению оптимальных (по минимуму приведенных затрат) параметров термоопреснительных установок и выведены аналитические выражения для определения оптимального чи-

сла ступеней испарения и оптимальной величины недогрева воды в поверхностных конденсаторах. Рассмотрены три схемы опреснения: 1) с поверхностными испарителями (с падающей пленкой); 2) с мгновенным вскипанием; 3) с гидрофобным теплоносителем.

Если доклады [4—6] носят расчетно-теоретический характер, то целью работы [7] является сравнительная оценка лишь тех схем термоопреснения, которые в настоящее время представляются реально осуществимыми и достаточно эффективными. К ним авторы относят: 1) схемы с мгновенным вскипанием с предварительной обработкой кислоты исходной воды для предотвращения солеотложений; 2) с мгновенным вскипанием с рециркуляцией морской воды и обработкой ее кислотой или введением затравочных кристаллов; 3) с выпариванием в вертикальных длиннотрубчатых аппаратах с падающей пленкой и с предварительной кислотной обработкой исходной воды; 4) с выпариванием с естественной циркуляцией и выпариванием с принудительной циркуляцией морской воды с применением в обоих случаях затравочных кристаллов. Сравнительный анализ проведен по тепловой экономичности, условиям предотвращения солеотложений, стоимости оборудования и надежности.

Авторы делают вывод, что в настоящее время в условиях СССР способ мгновенного вскипания в пределах рассмотренных производительностей по пресной воде несколько уступает по экономичности методу выпаривания. Этот вывод согласуется с результатами работы [2] и отчасти работы [4] и основывается на наличии большего опыта эксплуатации установок с вертикальными выпарными аппаратами по сравнению с аппаратами мгновенного вскипания. Однако с ростом производительности опреснительных установок при сочетании их с реакторами тепловой мощностью порядка $2\text{—}3$ тыс. Мвт экономические показатели этих двух типов установок становятся сравнимыми, а при дальнейшем увеличении тепловой мощности реактора преимуществами, по-видимому, будут обладать установки с мгновенным вскипанием.

Возможные технические решения

В работе [8] сделана попытка определить технические и экономические черты, которыми будет обладать ядерная двухцелевая установка относительно большой мощности с реактором Белоярского типа. Реактор этого типа относится к классу канальных реакторов, и в нем можно

Технико-экономические показатели двухцелевых установок

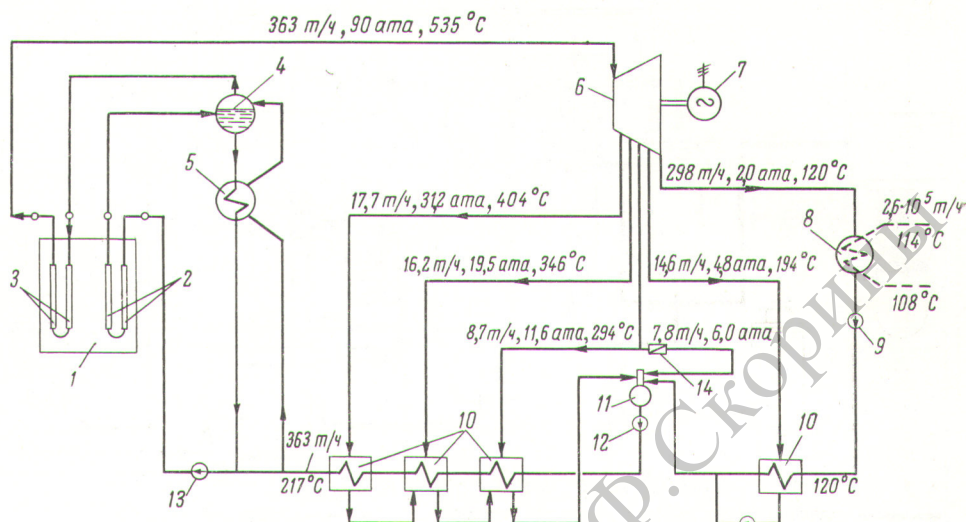
Таблица 2

Тип реактора	Тепловая мощность, Мвт	Температура пара, °С	Полезная электрическая мощность, Мвт	Капиталовложения в ядерную часть, млн. руб.	Себестоимость электроэнергии, коп/квт·ч	Тепло на опреснение, Гкал/ч	Себестоимость тепла греющего пара, коп/Гкал	Производительность по дистилляту, 10-3 т/сутки		Капиталовложения в опреснительную часть, млн. руб.		Себестоимость дистиллята без учета тепла, коп/т		Себестоимость дистиллята, коп/т	
								мгн *	верт **	мгн	верт	мгн	верт	мгн	верт
Ново-Воронежской АЭС	750	100 120	135 108	61,0	1,012	494 509	153,5 203,0	166,5 168,0	139,2 143,8	18,4 20,4	11,5 11,8	7,87 7,79	5,96 5,94	18,67 20,99	19,01 23,24
	1500	100 120	270 216	71,9	0,542	988 1018	83,0 108,0	333,0 336,0	278,4 287,6	34,6 38,7	22,2 23,0	7,57 7,53	5,83 5,83	13,46 14,57	12,89 14,99
	1875	100 120	338 271	75,6	0,488	1235 1272	74,8 97,6	418,0 490,5	349,5 359,0	42,6 47,6	27,7 28,5	7,49 7,46	5,81 5,81	12,80 13,81	12,15 14,02
	2250	100 120	405 324	78,3	0,470	1482 1527	71,9 94,0	502 564	419,5 430,5	50,6 56,5	33,0 34,0	7,44 7,41	5,78 5,78	12,54 13,52	11,89 13,77
Белоярской АЭС	760	100 120 140	242 235 228	68,9	0,609	368 373 380	96,0 106,0 115,3	204,2 381,0 429,0	103,8 105,2 107,3	14,3 15,7 16,1	8,8 8,9 9,0	8,06 8,02 8,00	6,05 6,05 6,04	14,88 14,91 15,36	14,21 15,06 15,84
	1520	100 120 140	485 470 456	79,3	0,464	735 747 760	73,1 80,9 88,0	249,3 276,0 285,7	207,1 211,0 214,8	26,4 29,1 30,0	16,8 17,1 17,4	7,68 7,65 7,64	5,89 5,89 5,88	12,87 12,90 13,27	12,10 12,76 13,36
	1900	100 120 140	606 588 570	82,3	0,458	920 934 950	72,2 79,8 87,0	311,3 344,7 357,2	259,2 263,8 267,2	32,4 35,7 36,8	20,8 21,1 21,5	7,61 7,57 7,56	5,85 5,85 5,84	12,72 12,76 13,13	11,99 12,62 13,23
	2280	100 120 140	727 706 684	84,0	0,457	1104 1121 1140	72,0 79,6 86,7	374,0 416,0 428,0	312,1 317,0 322,0	38,4 42,4 43,7	24,8 25,2 25,6	7,52 7,49 7,48	5,83 5,83 5,83	12,62 12,65 13,02	11,95 12,59 13,19
Шевченковской АЭС	760	100 120 140	242 235 228	86,9	0,736	368 373 380	116,0 128,0 139,5	204,2 381,0 429,0	103,8 105,2 107,3	14,3 15,6 16,1	8,8 8,9 9,0	8,06 8,02 8,00	6,05 6,05 6,04	16,31 16,35 16,94	15,90 16,95 17,89
	1520	100 120 140	485 470 456	97,4	0,300	735 747 760	47,0 52,3 57,7	249,3 276,0 285,7	207,1 211,0 214,8	26,4 29,1 30,0	16,8 17,1 17,4	7,68 7,65 7,64	5,89 5,89 5,88	11,01 11,05 11,33	9,89 10,33 10,78
	1900	100 120 140	606 588 570	100,4	0,233	920 934 950	36,5 40,4 44,0	311,3 344,7 357,2	259,2 263,8 267,2	32,4 35,7 36,8	20,8 21,1 21,5	7,61 7,57 7,56	5,85 5,85 5,84	10,20 10,19 10,37	8,95 9,29 9,58
	2280	100 120 140	727 706 684	102,5	0,177	1104 1121 1140	27,7 30,6 33,5	374,0 416,0 428,0	312,1 317,0 322,0	38,4 42,4 43,7	24,8 25,2 25,6	7,52 7,49 7,48	5,83 5,83 5,83	9,49 9,47 9,69	8,20 8,43 8,68

* Вскипание.
** Выпарка.

Рис. 2. Принципиальная тепловая схема энергетического контура установки с реактором Белоярского типа тепловой мощностью 520 Мвт:

1 — реактор; 2 — испарительные каналы; 3 — перегревательные каналы; 4 — барабан-сепаратор; 5 — подогреватель; 6 — турбина; 7 — генератор; 8 — конденсатор; 9 — конденсатный насос; 10 — регенеративные подогреватели; 11 — деаэратор; 12 — питательный насос; 13 — циркуляционный насос; 14 — дроссель.



получать большие единичные тепловые мощности, что является одним из решающих условий достижения экономической конкурентоспособности ядерных двухцелевых установок. Дополнительные положительные качества такого реактора — радиационная безопасность контура теплоносителя, высокий к. п. д. (обеспечивающий большую величину отношения выработки электроэнергии к выработке дистиллята), возможность использования типового паросилового оборудования, достаточно эффективно использование ядерного горючего, наличие опыта проектирования, сооружения и эксплуатации — позволяют считать его перспективным и эффективным для ядерных двухцелевых установок.

Рассмотрены две технологические схемы: 1) с докритическими параметрами теплоносителя (90 атм, 535° С); 2) со сверхкритическими параметрами (240 атм, 535/535° С). Первая схема представлена на рис. 2. В опреснительной части обеих систем используются 30-ступенчатые установки мгновенного вскипания. Ниже приведены результаты расчета основных экономических показателей двухцелевых установок с реакторами Белоярского типа:

	90 атм	240 атм
Тепловая мощность реактора, Мвт	520	1950
Электрическая мощность, Мвт	150	600
Расход тепла на опреснение, ккал/ч	$312 \cdot 10^6$	$1080 \cdot 10^6$
Выработка дистиллята, т/ч	$4,8 \cdot 10^3$	$16,8 \cdot 10^3$
Капиталовложения в ядерно-энергетическую часть, млн. руб.	62,5	83,0
Себестоимость электроэнергии, коп/квт·ч	1,060	0,458

Капиталовложения в опреснительную часть, млн. руб.	13,35	40,60
Себестоимость дистиллята без учета стоимости тепла, коп/т	8,11	7,43
Удельные затраты тепла на дистиллят, ккал/кг	65	64
Себестоимость тепла греющего пара, коп/Гкал	170	127
Себестоимость дистиллята, коп/т	19,12	13,57

В большинстве случаев в схемах ядерных двухцелевых установок предусматривается использование турбин с противодавлением. Наряду с наличием преимуществ применение таких турбин характеризуется и рядом недостатков, в частности недостаточной гибкостью работы двухцелевой установки в силу жесткой связи между производительностями по дистилляту и электроэнергии при возможных значительных колебаниях электрических и тепловых нагрузок. Требованию большей гибкости удовлетворяет схема, в которой используются турбины с регулируемым отбором пара. Поэтому в работе [9] во всех рассмотренных схемах приняты турбины с регулируемым отбором пара. Сопоставлялись три схемы двухцелевых установок: с реакторами Белоярского, Ново-Воронежского и Шевченковского типов с одинаковой производительностью по пресной воде (95 млн. м³/год), но с разными электрическими мощностями. Сопоставление проводилось по суммарным капиталовложениям (с разбивкой по укрупненным статьям расхода) и условным отпускным ценам на дистиллят при принятой отпускной цене на электроэнергию. Сделан вывод о том, что при больших производительностях по воде наиболее экономически предпочтительным

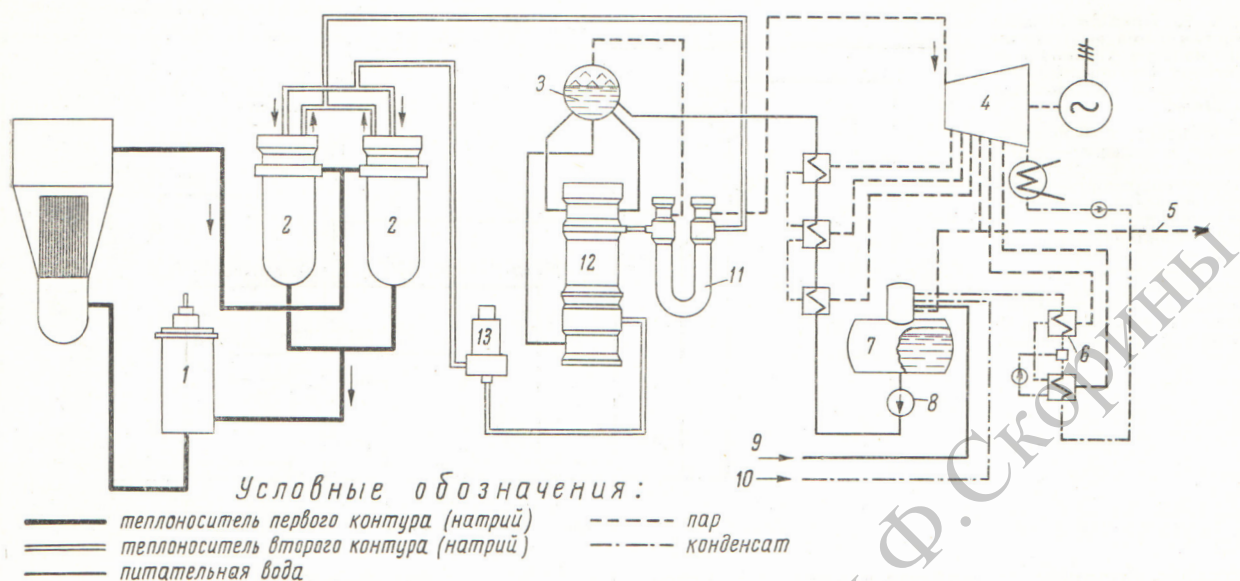


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема двухцелевой установки с реактором Шевченковского типа и турбинами с регулируемым отбором пара:

1 — насос первого контура; 2 — промежуточные теплообменники; 3 — барабан-сепаратор; 4 — турбогенератор; 5 — греющий пар на опреснение; 6 — подогреватель низкого давления; 7 — деаэратор; 8 — питательный насос; 9 — вода из химической водоочистки; 10 — возврат конденсата из опреснительной части; 11 — пароперегреватель; 12 — испаритель; 13 — насос второго контура.

является вариант установки с быстрым реактором Шевченковского типа (рис. 3).

Наряду с ядерными опреснительными установками большой мощности представляет интерес использование ядерных опреснительных установок относительно малых мощностей (производительностью 150—500 $m^3/ч$). Целесообразность применения таких установок определяется географической и хозяйственной спецификой ряда районов и мест, доставка пресной воды в которые затруднена, а транспортировка обычного топлива для опреснения соленой воды и производства электроэнергии сопряжена со значительными расходами. При этом в некоторых случаях ядерная опреснительная установка может иметь одноцелевое назначение.

Авторами работы [10] рассмотрена возможность создания опреснительных установок малой мощности, прототипом которых является АРБУС (теплоноситель — гидротерфенил), с использованием многокорпусной последовательной выпарки. Принципиальная схема установки приведена на рис. 4. Анализируются установки с реакторами тепловой мощностью 15; 30 и 70 $Mвт$. Применение реакторов органико-органического типа более целесообразно для установок с реакторами тепловой мощностью до 30 $Mвт$; для больших тепловых мощностей реакторов из экономических соображений более

эффективным является использование реакторов с органическим теплоносителем и твердым замедлителем. Основные технико-экономические показатели установок (оцененные по методике [1]) приведены в табл. 3.

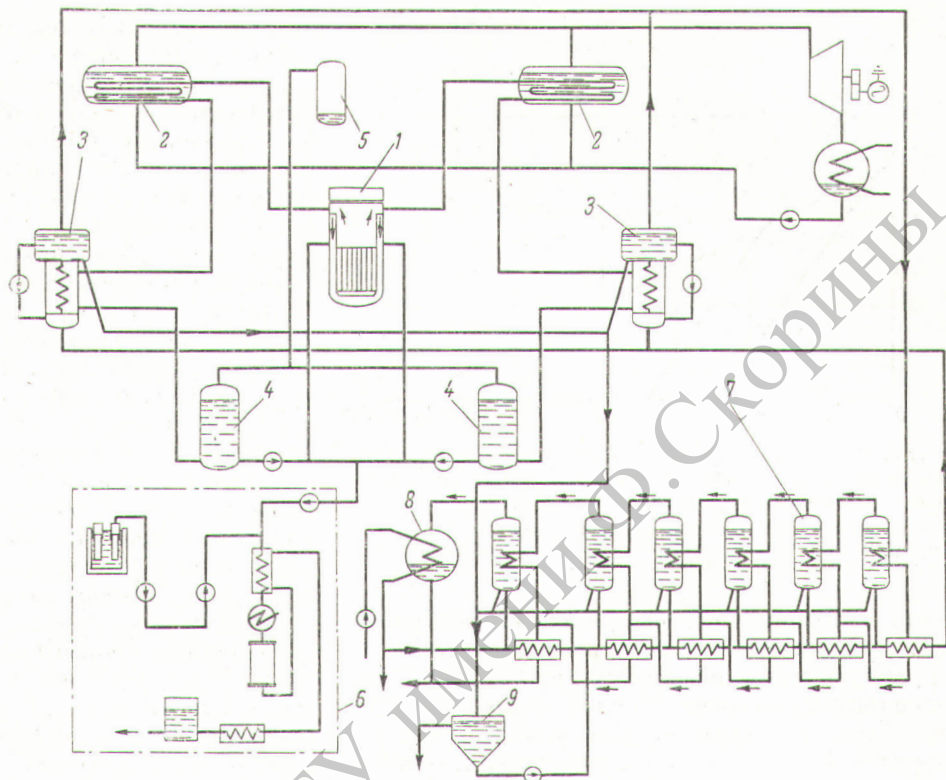
Оборудование и элементы установки могут доставляться на место сооружения в виде отдельных полностью смонтированных блоков, прошедших испытания на заводе-изготовителе. Веса и габариты блоков позволяют доставлять их к месту строительства любым видом транспорта (вес блоков не выше 20 t). Здание установок быстросборное, каркасно-щитовой конструкции.

Экономическая конкурентоспособность

Выше были приведены значения себестоимости электроэнергии и дистиллята для ядерных опреснительных установок большой производительности с различными типами реакторов. Эти значения позволяют судить о народнохозяйственной эффективности ядерных двухцелевых установок, т. е. затратах труда на производство электроэнергии и дистиллята. Методика [1] раздельного определения затрат позволяет избежать неопределенности в расчетах экономических показателей двухцелевых установок, которая возникает при использовании приме-

Рис. 4. Принципиальная тепловая схема опреснительной установки с реактором типа АРБУС:

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — испаритель (первая ступень); 4 — компенсатор объема; 5 — ресивер; 6 — блок регенерации; 7 — испарители; 8 — конденсатор; 9 — отстойник.



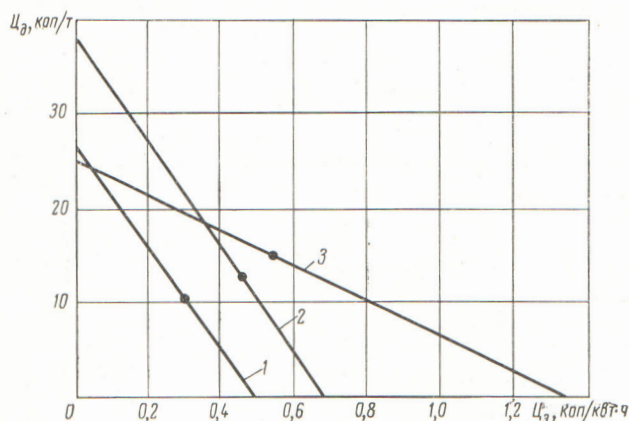
Технико-экономические показатели опреснительных установок

Таблица 3

Характеристики	Тепловая мощность реактора, Мвт		
	15	30	70
Полезная электрическая мощность, кВт	—	—	1500
Собственные нужды, кВт	400	750	1500
Расход тепла на опреснение, ккал/ч	$11 \cdot 10^6$	$22 \cdot 10^6$	$43,8 \cdot 10^6$
Удельные затраты тепла на дистиллят, ккал/ч	86,7	86,7	86,7
Выработка дистиллята, т/ч	127,5	255,0	505,0
Капиталовложения в опреснительную часть, млн. руб.	0,493	0,801	1,350
Суммарные капиталовложения в установку, млн. руб.	2,093	3,201	4,650
Себестоимость электроэнергии, коп/квт·ч	—	—	2,1
Себестоимость дистиллята, коп/т	68	57	42

няемой за рубежом методики назначения (фиксирования) цены на электроэнергию. Назначение цены на любой из видов продукции для оценки экономики двухцелевой установки при проведении работ по ее проектированию не дает возможности проанализировать влияние отдельных технических характеристик на себестоимость дистиллята и электроэнергии, тогда как этот вопрос является наиболее важным. Кроме того, в условиях, когда оба вида продукции являются одинаково важными с народнохозяйственной точки зрения (а это типично для СССР), удешевление одного из них за счет повышения цены на другой неприемлемо. Наконец, в настоящее время выдвигается требование приближения цен к уровню общественно необходимых затрат труда, что исключает возможность произвольного назначения цен.

В практике эксплуатации двухцелевых установок может оказаться целесообразным варьировать условные отпускные цены на электроэнергию и дистиллят, вырабатываемые установкой, в пределах суммарных издержек производства на эти два вида продукции. В таком случае на один из этих видов продукции может назначаться условная отпускная цена на осно-



Р и с. 5. Зависимость отпускной цены на дистиллят $\Pi_{\text{Д}}$ от отпускной цены на электроэнергию $\Pi_{\text{Э}}$ для двухцелевых установок с различными реакторами:

● — расчетные точки, соответствующие данным табл. 2; 1 — реактор Шевченковского типа; 2 — реактор Белоярского типа; 3 — реактор Ново-Воронежского типа.

ваний конъюнктурно-коммерческих соображений. Это автоматически определяет условную отпускную цену на другой вид продукции, поскольку суммарные издержки производства дистиллята и электроэнергии при любом перераспределении цен на них, естественно, остаются неизменными для каждой установки. При подобном подходе к делу, рассматривая двухцелевую установку как хозрасчетное предприятие, целесообразнее назначать условную отпускную цену на электроэнергию, исходя из средней себестоимости электроэнергии в энергосистеме, поскольку мощная ядерная двухцелевая установка будет включена в энергосистему.

На рис. 5 приведены построенные по данным табл. 2 зависимости отпускной цены на дистиллят от отпускной цены на электроэнергию для двухцелевых установок с вертикальными выпарными аппаратами и с реакторами Белоярского, Ново-Воронежского и Шевченковского типов при равных тепловых мощностях (1500 Мвт) и температуре греющего пара 120° С. На графиках обозначены точки, соответствующие себестоимости электроэнергии и дистиллята.

Наибольший эффект в снижении отпускной цены на дистиллят при повышении отпускной цены на электроэнергию достигается при использовании реакторов, обеспечивающих высокие начальные параметры пара и, следовательно, имеющих большое отношение выработки электроэнергии к выработке дистиллята (типа Белоярской и Шевченковской АЭС). Это объясняется тем, что в реакторах с высокими начальными параметрами пара для производства электро-

энергии используется большая доля располагаемого теплоперепада.

Другим экономически оправданным путем увеличения абсолютной величины выработки электроэнергии при той же производительности по дистилляту является использование на ядерной двухцелевой установке одновременно конденсационных турбин и турбин с противодавлением. Дополнительным преимуществом такой комбинированной установки является ее большая гибкость, отвечающая возможному несовпадению графиков нагрузки по электроэнергии и дистилляту. Для реакторов, работающих на насыщенном паре, выбор начального давления пара не оказывает существенного влияния на себестоимость электроэнергии и дистиллята; эффект же увеличения отпускной цены на электроэнергию с целью снижения отпускной цены на дистиллят для реакторов этого типа существенно меньше, чем для реакторов с перегревом пара.

Следует подчеркнуть, что в условиях, когда современный уровень развития ядерной энергетики обеспечивает получение значений себестоимости электроэнергии, находящихся на грани экономической конкурентоспособности с себестоимостью электроэнергии от обычных источников, коммерческие возможности для снижения отпускной цены на дистиллят за счет повышения отпускной цены на электроэнергию весьма невелики и экономический эффект в случае их реализации незначителен.

Технология дистилляции

Доклады по вопросам технологии дистилляционных установок, представленные на симпозиум, касаются двух наиболее важных проблем — теплообмена и коррозии материалов в морской воде.

В работе [11] обобщен опыт работы авторов с 1954 г. по предотвращению осаждения на теплообменных поверхностях накипи (резко ухудшающей теплообмен и, следовательно, производительность по дистилляту) путем добавки в опресняемую морскую воду затравки в виде тонко размолотого природного мела. В результате длительных работ на лабораторных и полупромышленных установках авторами показано, что использование затравки при условии вынесения зоны кипения за пределы зоны теплообмена является надежным и гарантированным методом полного предотвращения образования накипи на теплообменных поверхностях.

Интенсификация теплообмена приводит к существенному улучшению экономических показателей работы дистилляционных опреснительных установок. Изложенные в работе [12] исследования по интенсификации теплообмена ведутся в направлении: 1) устранения вредного влияния примесей неконденсирующихся газов в греющем паре на коэффициент теплоотдачи при конденсации за счет турбулизации потока пара, приводящей к разрушению паро-газового слоя вблизи греющей поверхности; 2) организации капельной конденсации пара на греющих поверхностях за счет использования гидрофобизаторов, стимулирующих капельную конденсацию; 3) разработки экономических методов повышения коэффициента теплоотдачи со стороны жидкости в теплообменных аппаратах за счет струйной подачи жидкости [опыты показали возможность повышения α до $(30 \div 35) \times 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$].

Изучение коррозии материалов в воде Каспийского моря, характеризующейся высоким содержанием кислорода, привело авторов работы [13] к выводу, что из наиболее дешевых и доступных конструкционных материалов для использования в опреснительных установках могут быть рекомендованы углеродистая сталь Ст. 3 (при условии деаэрации морской воды и отсутствия контакта с электроположительными материалами) и сплавы на медной основе ЛО70-1, МНЖ5-1, ЛА77-2 (для греющих трубок). Полоторалетнее испытание трубок из латуни ЛО70-1 в промышленной установке показало, что они не имеют коррозионных повреждений. Исследования [14] коррозии нержавеющей стали в подкисленном 3%-ном растворе хлористого натрия показали, что молибденистая нержавеющая сталь Х17Н13М3Т имеет большую сопротивляемость точечному коррозионному разрушению, чем нержавеющая сталь Х18Н10Т. Такой же результат получен и при исследовании целевой коррозии этих сталей.

Действующие опреснительные установки

С октября 1963 г. в Советском Союзе (в г. Шевченко) успешно эксплуатируется промышленная 4-ступенчатая установка, опресняющая воду Каспийского моря. В этой установке [11] используется система рециркуляции меловой затравки с вынесенными зонами кипения в выпарных аппаратах. Предусмотрена возможность работы установки как на паре давлением 5—6 атм из отборов турбины, так и на нагретой до 150° С воде из водогрейного котла. Получен-

ный дистиллят подается в городскую сеть питьевой воды. Установка имеет не только промышленное назначение; на ней также отрабатываются режимы опреснения воды, которые затем будут использованы на сооружаемой в г. Шевченко ядерной двухцелевой установке с быстрым реактором. Подробное описание установки дано в работе [15]. Общий итог двухлетней эксплуатации: установка проста и надежна в работе, устойчива при изменении различных параметров теплоносителя вплоть до длительного прекращения его подачи. Важнейшие характеристики 4-корпусной опреснительной установки в г. Шевченко [15] приведены ниже:

Производительность по товарному дистилляту, $\text{м}^3/\text{ч}$	200—210
Температура кипения морской воды, °С:	
в первом корпусе	106—110
в четвертом корпусе	45—50
Солесодержание упаренной морской воды на выходе из установки, кг/м^3	40—45
Концентрация затравки, кг/м^3 :	
в первом корпусе	10—15
в четвертом корпусе	40—42
Коэффициенты теплопередачи, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$:	
в первом корпусе	2700—2800
в четвертом корпусе	2100—2200
Солесодержание дистиллята, мг/л :	
в первом и втором корпусах	<50
в третьем и четвертом корпусах	2—5
Себестоимость дистиллята, коп/м^3 :	
при обогреве паром	35
при обогреве горячей водой	40
Составляющие себестоимости дистиллята, %:	
тепло	48—50
амортизация	38—40
эксплуатация	~13

Другая опреснительная установка, вырабатывающая дистиллят для восполнения потерь контура теплоносителя паротурбинной электростанции, сооружена в Баку [16]. Производительность установки 50 $\text{м}^3/\text{ч}$; опресняется вода Каспийского моря. Установка состоит из устройств для глубокого умягчения морской воды и испарителей, включенных в систему регенеративного подогрева электростанции.

Предварительное умягчение морской воды производится добавкой в нее извести, окончательное — натрий-катионированием в периодически регенерируемых фильтрах. В результате умягчения удаляются взвешенные и коллоидные примеси, морская вода дегазируется и ее общее солесодержание несколько уменьшается (содержание сульфатов при этом уменьшается в четыре-пять раз).

Умягченная вода подается в вертикальные испарители производительностью 12—15 т/ч каждый. Себестоимость получаемого дистиллята незначительно превышает стоимость умягченной воды, так как при принятой схеме включения испарителей почти отсутствуют потери тепла (незначительная часть тепла теряется с продувочной водой и на наружное охлаждение). Кроме того, полная автоматизация установки позволила исключить расходы на эксплуатационный персонал. Себестоимость дистиллята в зависимости от режимов и условий работы установок составляет 9,4—21,6 коп/т [16].

Вопросы опреснения соленых и солоноватых вод методами, не связанными с дистилляцией (электродиализом, газгидратным, ионного обмена), были рассмотрены в докладах [17—20].

В работе [21] оценивается возможность опреснения соленой воды дистилляцией с помощью гидрофобного теплоносителя. Сущность метода заключается в осуществлении контактного теплообмена между гидрофобным теплоносителем и опресняемой жидкостью с последующим разделением дистиллята, гидрофобного теплоносителя и рассола. Теплоносителем служат дифенильные смеси и парафин. Подобный тип термоопреснительных установок имеет ряд положительных качеств, которые дают основание считать их перспективными для использования в сочетании с ядерным реактором. Однако этот метод еще не вышел из стадии лабораторных и стендовых испытаний.

Особое место занимает работа [22] по медико-биологическим аспектам употребления опресненной воды, возникающим в связи с многочисленностью методов опреснения, основанных на использовании химически активных полимеров и малоизученных в токсикологическом отношении веществ, которые соприкасаются с водой. Автор отмечает, что с медико-биологической точки зрения большинство известных методов опреснения воды нуждается в дополнительных мероприятиях по улучшению качества воды. Эти мероприятия вполне осуществимы и сравнительно просты.

Наконец, в докладе [23] дан обзор работ, ведущихся в СССР в области опреснения соленых и солоноватых вод, а также используемых для этого методов.

Доклады СССР, представленные на Первый международный симпозиум по опреснению воды, показывают, что в нашей стране проводятся широкие исследования в этом направлении. Использование тепла ядерных реакторов — вполне осуществимый и экономически целесо-

образный способ получения пресной воды в больших масштабах для районов СССР, испытывающих в ней недостаток.

Поступила в Редакцию 21/X 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Корякин и др. «Атомная энергия», 19, 138 (1965).
2. А. А. Логинов и др. Анализ технико-экономических показателей ядерных энергетических опреснительных установок. Доклад № SWD/56, представленный СССР на Первый международный симпозиум по опреснению воды (Вашингтон, 3—9 октября 1965 г.).
3. Н. М. Синев и др. Доклад № 294, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
4. И. Л. Сергеевко. Анализ экономичности термических опреснительных установок большой мощности. Доклад СССР № SWD/71, представленный СССР на Первый международный симпозиум по опреснению воды (Вашингтон, 3—9 октября 1965 г.).
5. Л. С. Стерман, В. В. Губенко. Анализ тепловой экономичности энергетических установок с опреснителями высокой производительности. Там же, № SWD/70.
6. Б. Н. Голубков, А. И. Корнеев. Аналитический метод определения оптимальных параметров термоопреснительных установок. Там же, № SWD/69.
7. С. И. Голуб и др. Анализ различных схем дистилляционных опреснительных установок и их аппаратного оформления. Там же, № SWD/76.
8. Ю. И. Корякин и др. Использование реакторов Белоярского типа для двухцелевых опреснительных установок. Там же, № SWD/57.
9. И. Д. Дмитриев. Применение ядерных энергетических установок для опреснения соленых вод с одновременной выработкой электроэнергии. Там же, № SWD/72.
10. К. К. Полушкин и др. Ядерные опреснительные установки малой мощности. Там же, № SWD/58.
11. В. Б. Чернозубов и др. Предотвращение накипи в дистилляционных опреснительных установках с помощью затравки. Там же, № SWD/64.
12. В. Б. Чернозубов и др. Интенсификация теплообмена в испарительных установках. Там же, № SWD/62.
13. Е. В. Константинова, Л. С. Семенова, А. А. Дьяков. Коррозионная стойкость материалов в морской воде. Там же, № SWD/73.
14. М. Н. Фокин, М. М. Куртепов. О щелевой и точечной коррозии нержавеющей стали в растворах хлоридов при температурах до 100°С. Там же, № SWD/63.
15. Ф. П. Заостровский и др. Дистилляционная опреснительная установка в г. Шевченко. Там же, № SWD/61.
16. И. З. Макинский. Энергетическая опреснительная установка в Баку. Там же, № SWD/68.
17. В. А. Клячко и др. Опреснение солоноватых вод электродиализом. Там же, № SWD/59.

18. Г. Д. Павлов, И. Н. Медведев. Исследование газгидратного процесса опреснения воды. Там же, № SWD/67.
 19. В. Н. Смагин. Опреснение соленых вод методом ионного обмена. Там же, № SWD/75.
 20. А. П. Пашков и др. Ионитовые мембраны для опреснения соленых вод и их свойства. Там же, № SWD/74.

21. Е. Д. Мальцев. Опреснение морской воды методом дистилляции с помощью гидрофобного теплоносителя. Там же, № SWD/66.
 22. Е. В. Штаников. Медико-биологические аспекты опреснения воды. Там же, № SWD/65.
 23. В. А. Клячко. Исследования в области опреснения воды в СССР. Там же, № SWD/60.

Минимум критической массы при ограниченной концентрации урана

Б. П. КОЧУРОВ

УДК 621.039.51

Принцип максимума [1] применен к решению задачи на минимум критической массы при ограниченной концентрации урана. Показано, что оптимальной является трехзонная система: внутренняя зона с максимально допустимой концентрацией u_0 ; в средней зоне распределение урана соответствует постоянной плотности тепловых нейтронов; отражатель. Результаты приведены для плоской и сферической геометрий.

Задача на минимум критической массы без ограничения концентрации урана решена в работе [2] (см. также [3], стр. 330). Однако из-за конструктивных особенностей концентрации урана может быть ограничена, в частности для конечных реакторов с достаточно тонким отражателем, когда минимум критической массы [2] достигается при высокой концентрации урана.

В настоящей работе в теории двух групп определяется оптимальное распределение урана и минимальная критическая масса для реакторов с бесконечным и конечным отражателями. Для реактора с конечным отражателем задача формулируется следующим образом: задан реактор фиксированных размеров (задан размер от центра реактора до внешней границы отражателя, но не известна его толщина), найти распределение урана с концентрацией, не превышающей заданную, при котором критическая масса минимальна.

Предположим, что свойства замедлителя постоянны по всему реактору; плотность нейтронов обращается в нуль на одной и той же границе, одинаковой для обеих групп; размножение нейтронов происходит только в тепловой области.

В двухгрупповой теории распределение тепловых N и быстрых n нейтронов можно записать

в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta N - (u+1)N &= -n; \\ \Delta n - \frac{1}{\tau}n &= -\frac{\eta}{\tau}uN, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где за единицу длины принята длина диффузии в замедлителе L_0 ; под τ понимается величина τ/L_0^2 ; $\mu = \frac{\Sigma_{au}}{D} L_0^2$ — параметр, пропорциональный концентрации урана. Требуется найти такое распределение параметра u по реактору, чтобы величина $\int_V u dv$ была минимальной при условии, что $u \leq u_0$ (u_0 — заданная допустимая концентрация).

Сформулируем принцип максимума [1] в применении к данной задаче. Рассмотрим одномерную задачу, зависящую от пространственной координаты t , а именно плоский симметричный реактор, в центре которого $t = 0$. Введем

обозначения $x_0 = \int_0^t u dt$; $x_1 = N$; $x_2 = \frac{dN}{dt}$;

$x_3 = n$; $x_4 = \frac{dn}{dt}$. Уравнения (1) перепишем в виде

$$\frac{dx}{dt} = Ax,$$

где $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$; матрица

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ u+1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\eta u}{\tau} & 0 & \frac{1}{\tau} & 0 \end{bmatrix}.$$

Введем гамильтониан $\mathcal{H} = \psi_0 u + (\psi, Ax)$, где $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)$ — непрерывная век-