

Атомные двигатели на судах

В. В. Лаханин

В последние годы в ряде стран (СССР, США, Норвегии, Японии и др.) ведутся работы по применению атомной энергии для движения судов, анализируются условия, необходимые для их создания. Установлено, что мощность двигателей атомных судов должна быть достаточно большой—не менее 10 000 л. с., а скорость торговых атомных судов (18÷21 узел)—значительно выше скорости аналогичных обычных судов (12÷15 узлов). На атомных судах будут применяться паровые или газовые турбины. В настоящее время более целесообразно использование двухконтурной схемы отвода тепла с паротурбинной установкой и реактором водо-водяного типа на тепловых нейтронах. Для реализации в будущем преимуществ газотурбинной установки ведутся работы по созданию высокотемпературного реактора с газовым теплоносителем. Вес атомной судовой установки должен быть меньше суммарного веса обычной судовой установки и запаса топлива для нее. Расчеты показывают, что атомное судно может быть не менее экономично, чем обычное.

Общая характеристика атомных судов

В настоящее время из экономических соображений проектируются и строятся пока только крупные морские атомные суда: ледоколы, крупные танкеры (водоизмещением от 30 до 80 тыс. тонн), подводные лодки и т. д. При этом большое внимание уделяется вопросу о наименьшей, экономически выгодной мощности судовых атомных установок, что связано с вопросом расширения числа типов и размеров судов, пригодных для установки на них атомных двигателей.

До настоящего времени нижним пределом мощности считается мощность 10 000 л. с., причем выявилась тенденция к его снижению до 3000 л. с. (порядок мощности речных судов) [1]—[10].

Проектируемые скорости атомных судов колеблются в пределах (для торговых судов) 18—21 узла [1]—[10], тогда как скорость аналогичных судов с обычными двигателями равна 12÷15 узлам. Увеличение скорости на 40—50% резко повысит оборачиваемость и, следовательно, рентабельность судов.

Использование атомных двигателей на судах позволяет значительно продлить

автономность их плавания (от десятков суток для обычных судов до сотен суток для атомных), а длительные рейсы, в свою очередь, выгодны с точки зрения эксплуатации атомных двигателей—в этом случае реактор может долго работать в постоянном режиме, тогда как при частых остановках судна он вынужден работать в невыгодном переменном режиме с непроизводительным сбросом тепла во время остановок судна, поскольку опасение появления «иодных ям» (переотравление реактора продуктами деления), возникающих при остановках реактора, вынуждает держать его все время на мощности.

Вообще говоря, улучшить режим работы реактора при частых остановках судна и избежать непроизводительного сброса тепла можно, но при условии, если реактор имеет избыточную реактивность, достаточную для компенсации переотравления его продуктами деления во время остановки, а это требует применения сильно обогащенного дорогостоящего горючего.

Для ледоколов, кроме длительной автономности плавания, важной характеристикой является отношение мощности судна

Таблица 1

Сравнительная экономическая характеристика обычного и атомного танкеров

Расходы и доходы	Танкер с обычной силовой установкой		Танкер с атомной силовой установкой	
	млн. долларов	%	млн. долларов	%
Стоимость корпуса и оборудования . .	7,50	70,2	8,16	76,5
Стоимость силовой установки	3,18	29,8	8,30	77,5
Всего расходов на постройку	10,68	100,0	16,46	154,0
Амортизация и страхование	0,671	29,7	1,094	48,2
Содержание персонала, ремонт, обслуживание в портах	1,011	44,8	1,063	47,1
Расходы на горючее	0,578	25,5	1,104	48,7
Всего экспл. расходов в год	2,260	100,0	3,261	144,0
Годовой доход	3,880	100,0	3,900	100,5
Годовая прибыль	1,620	100,0	0,639	39,4

к его водоизмещению, т. е. число лошадиных сил, приходящееся на одну тонну водоизмещения. Это отношение принято называть энерговооруженностью [3]. Если для обычных ледоколов энерговооруженность колеблется в пределах 1,1—2,0 л. с./т, то для атомного ледокола она достигает 2,75 л. с./т.

Относительно стоимости атомных судов в литературе имеются только предварительные данные. Например, стоимость атомного крейсера (США) определяется суммой в 87 млн. долларов (в том числе реакторное оборудование—18 млн. долларов); на постройку одного из атомных грузо-пассажирских судов ассигновано 43 млн. долларов [5] и т. д.

В табл. 1 приведены данные [1] о стоимости постройки и эксплуатации двух танкеров на обычном и атомном горючем с приблизительно одинаковой годовой производительностью (290 тыс. т) при стоимости перевозки 1 т груза на обычном танкере—7,77 доллара, на атомном—11,15 доллара. Из табл. 1 следует, что в настоящее время стоимость атомного судна и горючего для него—выше соответствующей стоимости обычной судовой установки и горючего для нее.

В работе [1] указывается, что экономичность атомного танкера может быть большей

за счет повышения полезной грузоподъемности, а также за счет повышения производительности в результате увеличения скорости.

Судовые атомные установки

В настоящее время опубликовано сравнительно мало данных о судовых реакторах и схемах отвода тепла от них. Некоторые сведения приведены в табл. 2.

В опубликованных статьях [2], [11]—[13] рассматриваются в основном пять схем атомных установок, которые, по мнению авторов, могут применяться на судах:

1) двухконтурная схема с гетерогенным реактором на тепловых нейтронах и с водой под давлением;

2) одноконтурная схема с гетерогенным реактором на тепловых нейтронах и с кипением воды в активной зоне;

3) двухконтурная схема с гомогенным реактором на тепловых нейтронах;

4) трехконтурная схема с гетерогенным реактором на тепловых или промежуточных нейтронах и с графитовым замедлителем и натриевым теплоносителем;

5) одноконтурная схема с гетерогенным реактором на тепловых нейтронах с гелиевым теплоносителем.

Таблица 2

Некоторые сведения об иностранных судовых атомных установках

Судно	Реактор	Теплоноситель	Схема	Главный двигатель
Подводная лодка «Наутилус» (США)	Гетерогенный, на тепловых нейтронах, с водой под давлением	Вода	Двухконтурная	Паровая турбина; параметры пара перед турбиной: $P=17,58 \text{ кг/см}^2$ $t=219^\circ \text{C}$
Подводная лодка «Сивулф» (США)	Гетерогенный, на промежуточных нейтронах, с натриевым теплоносителем и графитовым замедлителем	Натрий	Трехконтурная	Паровая турбина
Проектирующийся норвежский танкер	Гетерогенный, с тяжелой водой под давлением	Тяжелая вода	Двухконтурная	Паровая турбина; параметры пара перед турбиной: $P=30,6 \text{ кг/см}^2$ $t=234^\circ \text{C}$
Проектирующееся грузо-пассажирское судно (США)	Гетерогенный с водой под давлением	Вода	Двухконтурная	Паровая турбина

В первых четырех схемах используются паровые турбины, в последней—газовая турбина. Некоторые специалисты по атомному судостроению [2], [11]—[13] считают наиболее выгодной последнюю схему, так как чистый гелий не активизируется в реакторе, а это облегчает проектирование защиты. По сравнению с паротурбинной газотурбинная установка имеет меньший вес и размеры [11], [14] и более высокий к. п. д. ($38\div 42\%$). Тем не менее преимущества газотурбинной установки многими оспариваются [15]. Возражения сводятся в основном к следующему: 1) паровые турбины, а также реакторы с водой под давлением лучше освоены, более дешевы и надежны; 2) гелий дефицитен и дорог; 3) высокотемпературные реакторы с газовым теплоносителем еще не освоены; 4) приведенные выше значения к. п. д. газотурбинной установки могут быть достигнуты только при температуре газа на входе в турбину не ниже 760°C . Наименьшие значения температуры, обеспечивающие выгодность газовых турбин, равны $600\text{—}650^\circ \text{C}$, тогда как надежная работа реактора с газовым теплоносителем может быть обеспечена при температуре газов на выходе $\sim 400^\circ \text{C}$. В этом случае к. п. д. газотурбинных уста-

новок ниже к. п. д. паротурбинных установок.

На величину к. п. д. двухконтурных схем, в которых используется реактор с водой под давлением, сильно влияет величина давления, так как от него зависят параметры пара перед турбиной. В настоящее время в таких реакторах применяют давление $100\div 140 \text{ атм}$. При этом во втором контуре можно получить насыщенный пар под давлением $28\div 60 \text{ атм}$ или перегретый пар давлением $10\div 26 \text{ атм}$. Следовательно, при использовании перегретого пара, если не применять отдельного пароперегревателя на обычном топливе, давление пара уменьшается, а это в некоторых случаях приводит к снижению к. п. д. по сравнению со схемой использования насыщенного пара под более высоким давлением.

При использовании насыщенного пара следует применять промежуточное осушение или перегрев пара. Для пояснения на рисунке приведены четыре схемы отвода тепла и термодинамические циклы для них в i -с-координатах [16], [17].

Во всех четырех случаях начальная температура во втором контуре принята равной 232°C . Этой температуре соответствует дав-

ление насыщенного пара 29,5 *ата*. Для схемы с перегретым паром принято давление, уменьшенное в два раза—14,75 *ата*. В варианте с отдельным пароперегревателем на обычном топливе пар под давлением 29,5 *ата* перегревается в пароперегревателе до 480° С. Во всех случаях применен регенеративный цикл паросиловой установки с отборами пара для подогрева питательной воды.

Расчеты показывают, что схемам *а* и *б* (с использованием насыщенного пара) соответствует к. п. д. установки, равный 27,8%, схеме *в* (с использованием перегретого пара с пониженным давлением)—24,3%, а схеме *г* (с использованием перегретого пара высокой температуры)—32,3%.

Таким образом, усовершенствованные циклы насыщенного пара при пониженном

давлении могут оказаться выгоднее цикла перегретого пара. В работе [15] указывается на особую выгоду схемы с высоким перегревом, получаемым за счет сжигания обычного топлива (см. рисунок, *г*).

Наконец, следует упомянуть о весе судовых атомных установок. Если сравнивать два судна, атомное и обычное, с одинаковым полным водоизмещением, то вес их корпусов, команд и запасов для них можно считать одинаковым. Что же касается механизмов, топлива и полезной грузоподъемности, то их общий вес будет в обоих случаях одинаковым, но ввиду малого веса ядерного горючего полезная грузоподъемность атомного судна будет больше, чем обычного [15], [17].

Поступила в редакцию 23 III 1957 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shipbuilding and Shipping Record 88, 199 (1956).
2. K. Maddocks, Shipbuilder and Marine Engine-builder 63, 306 (1956).
3. Судостроение № 1, 11 (1957).
4. Директивы XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. Изд. «Правда», 1956, стр. 8.
5. The Motor Ship XXXVII, 393 (1957).
6. Shipbuilding and Shipping Record 88, 93 (1956).
7. Shipbuilding and Shipping Record 88, 130 (1956).
8. I. Cockcroft, Atomics Engineering and Technology 7, 241 (1956).
9. Shipbuilding and Ship Record 87, 372 (1956).
10. I. Cockcroft, Shipbuilding and Shipping Record 87, 280 (1956).
11. K. Maddocks, Shipbuilding and Shipping Record 86, № 25 (1955).
12. K. Maddocks, Shipbuilding and Shipping Record 86, № 26 (1955).
13. K. Maddocks, The Motor Ship XXXVI, № 430 (1956).
14. Witzke and S. A. Maverstick, The Motor Ship, XXXV, 188 (1954).
15. The Motor Ship XXXVI, 514 (1956).
16. Engineering 181, 78 (1956).
17. Atomics Engineering and Technology 7, 97 (1956).
18. Л. М. Ногид, Теория проектирования судов. Судпромгиз, 1955, стр. 44.