

Ордена Ленина

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

ИАЭ-2577

547605985

*В.А.Лезасов, Г.А.Котельников,*

*Н.Н.Пономарев-Степной, В.К.Попов,*

*А.Н.Проценко, А.Я.Столяревский,*

*Н.М.Троценко*

**Сравнительная оценка возможностей  
использования  
высокотемпературного и низкотемпературного  
реакторов  
для производства стали  
при электролитическом получении водорода**

B21

Москва 1975

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И.В.КУРЧАТОВА

В.А.Дегасов, Г.А.Котельников,  
Н.Н.Пономарев-Степной, В.К.Попов,  
А.Н.Проценко, А.Я.Столяревский,  
Н.М.Троценко

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРОВ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ  
ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ ПОЛУЧЕНИИ ВОДОРОДА

М о с к в а  
1975

Ключевые слова: ядерная энергетика, электролиз воды, водород, черная металлургия.

Изложены результаты сравнительной оценки стоимости энергозатрат на производство стали в случаях использования высокотемпературного газослаждаемого реактора (ВТГР) и реакторов типа ВВЭР и РБМК при электролизном способе получения восстановительного газа (водорода).

## В В Е Д Е Н И Е

Известно, что в настоящее время основное направление внедрения ЯЭУ в черную металлургию связывается с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР) с температурой теплоносителя  $\sim 900^{\circ}\text{C}$  [1,2].

Однако недавно появилось сообщение о проекте использования для той же цели тяжело-водного реактора CANDU с температурой теплоносителя  $280\text{--}310^{\circ}\text{C}$  [3].

В связи с тем что параметры CANDU близки к параметрам отечественных аппаратов типа ВВЭР и РБМК, интересно провести сопоставление возможностей использования высокотемпературного и водоохлаждаемых низкотемпературных реакторов для нужд черной металлургии.

Такое сопоставление и является целью настоящей работы.

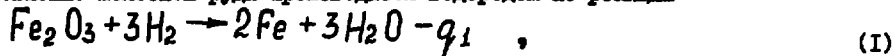
Сопоставление проводится для случая прямого восстановления железной руды водородом в предположении стационарного состояния производства, когда оба варианта предполагаются одинаково развитыми. Мы также не будем учитывать различия в капитальной составляющей на строительство оборудования для восстановления железной руды. (Высокотемпературные теплообменники в варианте с ВТГР, устройства электроподгрева в варианте с ВВЭР или РБМК.) Поэтому оценки будут относиться, за исключением себестоимости электролизованного водорода, только к энергозатратам и производительности комбинатов.

Равным образом мы не будем касаться специфических трудностей создания высокотемпературных теплообменников для нагрева водорода, обусловленных его высоким коэффициентом диффузии при обсуждаемых температурах ( $\sim 800^{\circ}\text{C}$ ). То есть мы будем полагать, что все технические трудности, стоящие на пути внедрения ВТГР, успешно преодолены.

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Примем, что

восстановление железной руды производится водородом по реакции



водород вырабатывается с помощью электроэнергии от АЭС методом электролитического разложения воды:



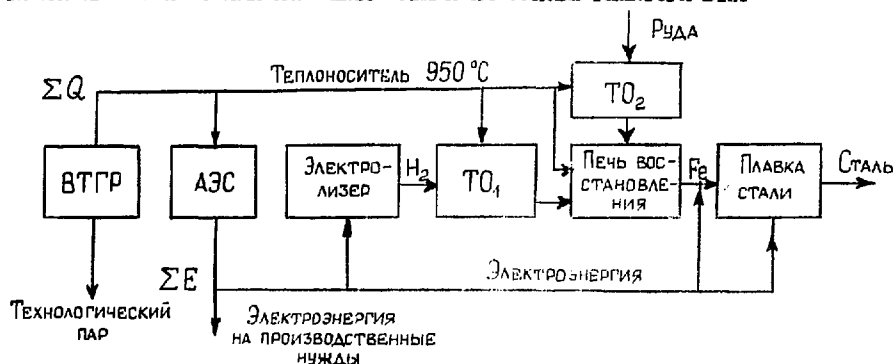
восстановление железной руды происходит при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  [2,4].

Будем различать энергозатраты, получаемые от реактора в форме тепловой энергии  $Q$  и в форме электроэнергии  $E$ . Величины, относящиеся к варианту с низкотемпературным реактором, условно обозначаемым ВВЭР, будем помечать штрихом:  $Q'$ ,  $E'$ . Введем в рассмотрение совокупность основных технологических процессов, необходимых для получения стали, и статьи энергозатрат по этим процессам.

Таблица I  
Основные технологические процессы производства стали

Наименование процесса	Энергозатраты			
	ВТГР		ВВЭР	
	$Q$	$E$	$Q'$	$E'$
Получение водорода методом электролиза воды	-	+	-	+
Подогрев водорода до температуры 250°C	+	-	+	-
Подогрев руды до температуры реакции 800°C	+	-	-	+
Проведение реакции восстановления руды	+	-	-	+
Подогрев губчатого железа до температуры плавления 1600°C	-	+	-	+
Плавка стали	-	+	-	+
Получение производственного пара	+	-	+	-
Электроэнергия на производственные нужды	-	+	-	+

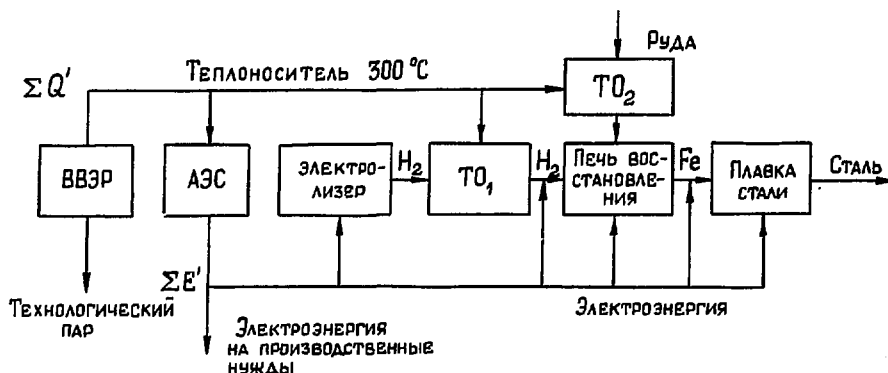
## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ НА ОСНОВЕ РЕАКТОРА ВТГР



Согласно схеме, ВТГР вырабатывает тепло для АЭС, термического подгрева восстановительного газа через теплообменник  $ТО_1$ , термического подгрева руды через теплообменник  $ТО_2$ , а также вырабатывает тепло для проведения реакции восстановления. Температура теплоносителя ВТГР принята равной 950°C [2], что при температуре реакции восстановления 800°C должно обеспечить необходимые тепловые потоки в сочетании с умеренными размерами теплообменников. Получение технологического пара давлением 4-8 ата, необходимого для производства губчатого железа и выплавки стали, в настоящей схеме предполагается осуществить за счет утилизации низкотемпературного тепла газотурбинных установок во избежание затрат высокотемпературного тепла.

АЭС снабжает электроэнергией электролизер и сталеплавильные печи, осуществляет электроподогрев губчатого железа до температуры плавления, а также обеспечивает электроэнергией производственные нужды.

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ НА ОСНОВЕ РЕАКТОРА ВВЭР (РЕМЖ)



Согласно схеме, ВВЭР вырабатывает тепло для АЭС, начального термического подогрева восстановительного газа и руды через теплообменники  $ТО_1$  и  $ТО_2$ , выработки технологического пара для производства губчатого железа и выплавки стали. Температура теплоносителя ВВЭР принята равной  $300^\circ\text{C}$ .

АЭС снабжает электроэнергией электролизер и сталеплавильные печи, осуществляет электроподогрев восстановительного газа до необходимой температуры, обеспечивает тепло реакции восстановления железной руды, осуществляет электроподогрев губчатого железа до температуры плавления, а также обеспечивает электроэнергией производственные нужды.

### 4. РАСЧЕТ БАЛАНСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ

Примем величину удельной теплоты реакции восстановления железной руды равной [5]

$$q_1 = 23 \cdot 10^3 \text{ кал/моль},$$

а удельную теплоту реакции диссоциации воды [6]

$$q_2 = 57,8 \cdot 10^3 \text{ кал/моль}.$$

Условимся относить энергозатраты к процессу получения 1 т стали в расчете на то, что для этого потребуется 1 т губчатого железа. Расчет проведем для различных стадий технологического процесса, полагая, что точность парциального вычисления не превышает 10% и определяется главным образом точностью, с которой известен к.п.д. соответствующей установки. Предположим, что ошибки статистически независимы и распределены по нормальному закону. Поэтому квадрат суммарной ошибки будем вычислять как сумму квадратов парциальных ошибок.

#### 4.1. Энергозатраты на получение водорода

$$E_1 = E'_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{6}{112} \cdot \frac{q_2}{23} \cdot \frac{10^6}{860 \cdot 10^3} = (3,2 \pm 0,32) 10^3 \frac{\text{квт.ч}}{\text{т Fe}} = (2,75 \pm 0,28) \frac{\text{кал}}{\text{т Fe}}.$$

Здесь  $\eta_3 = 0,57$  - к.п.д. электролизера [7],

$6/112$  - отношение весовых количеств водорода и железа из реакции (1),

$860 \cdot 10^3$  - коэффициент пересчета тепловых единиц в электрические: 1 кВтч =  $860 \cdot 10^3$  кал.

#### 4.2. Энергозатраты на нагрев водорода до температуры реакции восстановления 800°C

$$Q_2' = \frac{6}{112} C_{p1} \Delta T_2 \frac{10^6}{\eta_{T0_1}} = (0,167 \pm 0,017) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}},$$

$$Q_2 = \frac{6}{112} C_{p1} \Delta T_{2.1}' \frac{10^6}{\eta_{T0_1}} = (0,039 \pm 0,004) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}},$$

$$E_2' = \frac{6}{112} C_{p1} \Delta T_{2.2}' \frac{1}{\eta_{эд}} \cdot \frac{10^6}{860 \cdot 10^3} = (132 \pm 13) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т Fe}} = (0,114 \pm 0,011) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}}.$$

Здесь  $C_{p1} = 3,46 \text{ кал/г}^\circ\text{C}$  - удельная теплоемкость водорода [5],  
 $\Delta T_2 = 720^\circ\text{C}$  - температура термического подогрева водорода в варианте с ВТТР (температурный перепад на  $T_{O_1}$  принят равным  $150^\circ\text{C}$ , температура водорода на выходе электролизера -  $80^\circ\text{C}$  [7]),  $\Delta T_{2.1}' = 170^\circ\text{C}$  - температура термического подогрева водорода в варианте с ВВЭР (температурный перепад на  $T_{O_1}$  принят равным  $50^\circ\text{C}$ , температура водорода на выходе электролизера -  $80^\circ\text{C}$ ),  
 $\Delta T_{2.2}' = 550^\circ\text{C}$  - температура электроподогрева водорода в варианте с ВВЭР,  
 $\eta_{T0_1} = \eta_{T0_1}' > 0,8$  - к.п.д. теплообменников,  
 $\eta_{эд} > 0,9$  - к.п.д. устройств электроподогрева.

#### 4.3. Энергозатраты на нагрев руды и восстановление железа

$$Q_3 = \frac{160}{112} C_{p2} \Delta T_3 \frac{10^6}{\eta_{T0_2}} + \frac{q_1}{112} \cdot \frac{10^6}{\eta_{пв}} = (0,532 \pm 0,038) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}},$$

$$Q_3 = \frac{160}{112} C_{p2} \Delta T_{3.1}' \frac{10^6}{\eta_{T0_2}} = (0,082 \pm 0,008) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}},$$

$$E_3' = \left( \frac{160}{112} C_{p2} \Delta T_{3.2}' \frac{1}{\eta_{эд}} + \frac{q_1}{112 \eta_{пв}'} \right) \frac{10^6}{860 \cdot 10^3} = (461 \pm 33) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т Fe}} = (0,396 \pm 0,028) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}}.$$

Здесь  $C_{p2} = 0,2 \frac{\text{ккал}}{\text{г}^\circ\text{C}}$  - удельная теплоемкость руды [5],  
 $\Delta T_3 = 770^\circ\text{C}$  - температура термического подогрева руды в варианте с ВТТР (предполагается, что начальная температура руды в обоих вариантах составляет  $30^\circ\text{C}$ , температурный перепад на  $T_{O_2}$  принят равным  $150^\circ\text{C}$ ),  
 $\Delta T_{3.1}' = 240^\circ\text{C}$  - температура термического подогрева руды в варианте с ВВЭР (температурный перепад на  $T_{O_2}$  принят равным  $30^\circ\text{C}$ ),  
 $\Delta T_{3.2}' = 530^\circ\text{C}$  - температура электроподогрева руды в варианте с ВВЭР,  
 $\eta_{пв} = \eta_{T0_2} = 0,8$  - к.п.д. печи прямого восстановления в варианте с ВТТР,  
 $\eta_{пв} = \eta_{эд}' = 0,9$  - к.п.д. электропечи прямого восстановления в варианте с ВВЭР,  
 $\eta_{T0_2} = \eta_{T0_2}' = 0,8$  - к.п.д. теплообменников для термического нагрева руды.

#### 4.4. Энергозатраты на получение стали

$$E_4 = E_4' = (C_{p3} \Delta T_4 + q_3) \frac{10^6}{\eta_{пв} \cdot 860 \cdot 10^3} = (326 \pm 25) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{т Fe}} = (0,280 \pm 0,021) \frac{\text{Гкал}}{\text{т Fe}}.$$

Здесь  $C_{p3} = 0,2 \text{ кал/г}^\circ\text{C}$  - удельная теплоемкость железа [5],  
 $\Delta T_4 = \Delta T_4' = 800^\circ\text{C}$  - температура электроподогрева губчатого железа от температуры восстановления  $800^\circ\text{C}$  до температуры плавления  $1600^\circ\text{C}$ ,  
 $q_3 = 64,4 \text{ кал/г}^\circ\text{C}$  - удельная теплота плавления стали [5],  
 $\eta_{пв} = \eta_{пв}' = 0,8$  - к.п.д. сталеплавильных печей.

4.5. Энергозатраты на производственные нужды в низкотемпературном паре и электроэнергии (питание газодувок, отопление цехов и др.)

Примем значения обсуждаемых величин [8] с точностью 20%:

$$Q_5 = (0,25 \pm 0,05) \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}},$$

$$E_5 = E'_5 = (120 \pm 24) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\Gamma_{\text{Fe}}} = (0,103 \pm 0,020) \frac{\Gamma_{\text{КАЛ}}}{\Gamma_{\text{Fe}}},$$

$$E'_6(Q'_5) = (44 \pm 9) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\Gamma_{\text{Fe}}} = (0,038 \pm 0,007) \frac{\Gamma_{\text{КАЛ}}}{\Gamma_{\text{Fe}}}.$$

Обратим внимание на то, что в случае реактора ВТТР тепловые потребности в выработке технологического пара удовлетворяются за счет утилизации низкотемпературного тепла газотурбинных установок. Поэтому в тепловом балансе высокотемпературного тепла эта составляющая не должна учитываться. В случае реактора ВВЭР положение иное. Можно показать, что путем надлежащего теплофикационного режима получения пара давлением 4-8 ата эта статья энергозатрат эквивалентна увеличению затрат электроэнергии на величину  $E'_6(Q'_5) = 44 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т Fe}$ .

4.6. Суммарные энергозатраты

$$\sum Q_j = Q_2 + Q_3 = (0,699 \pm 0,041) \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}},$$

$$\sum E_j = E_1 + E_4 + E_5 = (3,646 \pm 321) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\Gamma_{\text{Fe}}} = (3,14 \pm 0,27) \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}},$$

$$\sum Q'_j = Q'_2 + Q'_3 = (0,121 \pm 0,009) \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}},$$

$$\sum E'_j = E'_1 + E'_2 + E'_3 + E'_4 + E'_5 + E'_6 = (4,283 \pm 323) \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\Gamma_{\text{Fe}}} = (3,68 \pm 0,28) \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}}.$$

Так как в обоих случаях обеспечивается теплоэлектроснабжение одних и тех же металлургических процессов, то не вызывает удивления тот факт, что суммарные полезные энергозатраты одинаковы и составляют  $\sim 3,80 \pm 0,28 \Gamma_{\text{КАЛ/Т Fe}}$ . Основная доля энергозатрат в обоих случаях приходится на электролиз, вклад которого достигает 70%.

5. Расчет баланса стоимости энергетических затрат и оценка себестоимости водорода

Примем стоимость электроэнергии в случае ВВЭР равной 0,6 коп/кВт.ч [9], а в случае реактора ВТТР той же самой либо на 15% меньшей [10]

$$P_E = 0,6 \div 0,51 \text{ коп/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3)$$

$$P'_E = 0,6 \text{ коп/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (4)$$

Для расчета тепловой составляющей учтем, что в стоимости электроэнергии около 30% приходится на долю, связанную с электрооборудованием [10]. (Машинный зал, турбоагрегаты, эксплуатационные расходы и т.д.) Поэтому стоимость тепловой энергии будем оценивать по формуле



$$P_Q = \frac{P_E \eta_{\text{АЭС}}}{1,3 \cdot 860 \cdot 10^3} \frac{\text{коп}}{\text{кал}},$$

где  $P_E$  - стоимость электроэнергии в коп/кВт.ч,

$\eta_{\text{АЭС}}$  - к.п.д. АЭС. Примем, что для ВТГР  $\eta_{\text{АЭС}} = 0,4$ , а для ВВЭР  $\eta'_{\text{АЭС}} = 0,3$ .  
Используя (3+4), в итоге получим

$$P_Q = (2,15 \div 1,83) 10^{-7} \text{ коп/кал}, \quad (5)$$

$$P'_Q = 1,61 \cdot 10^{-7} \text{ коп/кал}. \quad (6)$$

С помощью найденных величин вычислим стоимость энергозатрат, отнесенных к I т стали:

$$\sum P_j = P_Q \sum Q_j + P_E \sum E_j = (2.340 \pm 192) \div (1.990 \pm 163) \text{ коп}, \quad (7)$$

$$\sum P'_j = P'_Q \sum Q'_j + P'_E \sum E'_j = (2.589 \pm 194) \text{ коп}. \quad (8)$$

Согласно расчету, различие заключено в пределах от  $(249 \pm 273)$  коп до  $(599 \pm 254)$  коп. Особенность оценок (7)-(8), на основе которых получены эти разности, состоит в том, что их относительная погрешность ( $< 10\%$ ), по-видимому, занижена вследствие квадратичного закона сложения ошибок.

Максимальное различие, относящееся к случаю стоимости электроэнергии по 0,51 коп за I кВт.ч на АЭС с ВТГР, лишь вдвое превышает I  $\sigma$  погрешность расчета. В относительных единицах различие соответственно равно II и 30%.

Следует отметить, что проведенное сопоставление достаточно устойчиво к отдельным возмущениям в технологических процессах. Например, понижение температуры восстановления руды с 800 до 600°C приводит к смещению оценок с II до 9% и с 30 до 25%, что укладывается в пределы статистической погрешности. Равным образом не выходит за пределы ошибок и эффект от учета утилизации тепла сталеплавильного производства. Такая ситуация является следствием определяющей энергоемкости электролиза, затраты на который в расчете на производство I т стали составляют

$$(1920 \pm 192) \div (1630 \pm 163) \text{ коп} \quad \text{для ВТГР} \quad (9)$$

и

$$(1920 \pm 192) \text{ коп} \quad \text{для ВВЭР}. \quad (10)$$

В относительных единицах это достигает 82% для высокотемпературного реактора и 74% для водо-водяного при себестоимости водорода, вычисляемой по формуле

$$P_{H_2} = E_1 \frac{112}{6 \cdot 10^6} \int_{H_2} \frac{P_E}{0,7} = (4,5 \pm 0,6) \div (3,8 \pm 0,5) \text{ коп/м}^3, \quad (11)$$

$$P'_{H_2} = (4,5 \pm 0,6) \text{ коп/м}^3. \quad (12)$$

Здесь  $E_1 = 3200$  кВт.ч/т Fe - энергозатраты на производство водорода в расчете на I т стали,

$\int_{H_2} = 88 \text{ г/м}^3$  - плотность водорода,

$P_E = 0,6 \pm 0,51$  коп/кВт.ч и  $P'_E = 0,6$  коп/кВт.ч - стоимость I кВт.ч электроэнергии на АЭС с ВТГР и ВВЭР соответственно,

0,7 - доля затрат электроэнергии от общей себестоимости электролизного водорода [7].

Погрешность оценок (11)-(12) вычислена, исходя из 10% точности энергозатрат  $E_1$  и 10% точности коэффициента 0,7.

Для сравнения приведем стоимость I м<sup>3</sup> водорода, получаемого конверсией природного газа. По проекту, выполненному для Лисичанского химического комбината, себестоимость составляет 1,79 коп/м<sup>3</sup> [11], что примерно в 2,1+2,5 раза меньше оценок (11)-(12).

Следует иметь в виду, что дальнейшее совершенствование электролизной технологии и снижение стоимости электроэнергии, вырабатываемой АЭС, а также вероятное повышение цен на природный газ могут привести к значительному сближению стоимости электролизного и конверсионного водорода. Дальнейшее удешевление производства водорода может быть достигнуто также использованием термохимического способа получения водорода, который, согласно некоторым оценкам [13,14], может быть реализован с к.п.д. 50-55%.

#### 6. ОЦЕНКА ГОДОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЯДЕРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Примем тепловую мощность  $W$  реакторов ВТГР и ВВЭР одинаковой и равной 1000 МВт(т). Обозначим через  $M$  годовую производительность, выраженную в тоннах стали. Расчет произведем по формуле

$$M = \frac{Wt}{\eta_{\text{АЭС}} \sum E_j + 1,16 \cdot 10^3 \sum Q_j} \cdot \frac{\text{т стали}}{\text{год}},$$

где  $W$  - тепловая мощность в кВт,

$t = 8000$  час/год - эффективное время реакторов на мощности 1000 МВт,

$\sum E_j$  кВт.ч/т Fe и  $\sum Q_j$  Гкал/т Fe - энергозатраты на производство 1 т стали из раздела 4.6,

$\eta_{\text{АЭС}}$  - к.п.д. соответствующей АЭС.

Численные оценки приводят к результату

$$M(\text{ВТГР}) = (0,80 \pm 0,07) \text{ млн. т стали / год}, \quad (13)$$

$$M'(\text{ВВЭР}) = (0,56 \pm 0,05) \text{ млн. т стали / год}. \quad (14)$$

Различие в производительности, таким образом, составляет  $(0,24 \pm 0,08)$  млн.т.стали/год (30%).

#### 7.0 КАНАДСКОМ ВАРИАНТЕ ЯДЕРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В канадском варианте [3] в отличие от изложенных схем реактор обеспечивает энергозатраты в форме электроэнергии только на процессы получения водорода, выплавки стали, производства проката и вспомогательные технологические нужды. Вычисленная применительно к данному варианту производительность комбината составит

$$\tilde{M}(\text{ВТГР}) = \frac{Wt}{\sum E_j} \eta_{\text{АЭС}} = \frac{Wt}{E_1 + E_4 + E_5 + E_{\text{доп}}} \eta_{\text{АЭС}} = 0,82 \text{ млн. } \frac{\text{т стали}}{\text{год}}, \quad (15)$$

$$\tilde{M}'(\text{ВВЭР}) = 0,62 \text{ млн. т стали / год}, \quad (16)$$

где  $E_{\text{доп}} = 234$  кВт.ч/т Fe - расход электроэнергии в прокатном производстве [12], а различие в производительности комплексов обусловлено исключительно различием в к.п.д. АЭС (40% против 30%).

Если воспользоваться параметрами реактора CANDU ( $\eta_{\text{АЭС}} = 0,3$ ;  $W = 1000 + 2000$  МВт(э)) и вместо 8000 эффективных часов использовать полный год (8800 часов), то формула (15) приводит к результату  $(2,3 + 4,6$  млн. т/год), который несколько ниже  $(3 + 5$  млн.т/год) указанного в сообщении [3].

Очевидно, что в случае канадского варианта использования реакторов ВТГР и ВВЭР стоимость энергозатрат на производство стали, рассчитанная по предложенной методике, оказывается равной или на 15% меньшей для ВТГР.

## 8. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведен анализ сравнительных возможностей применения реакторов ВТГР и ВВЭР для производства стали в случае, когда восстановление железной руды осуществляется водородом, вырабатываемым путем электролиза воды и когда все энергетические потребности производства обеспечиваются за счет реакторного тепла и электроэнергии АЭС.

2. Оценки получены для стационарного состояния производства, когда оба варианта предполагаются одинаково развитыми, а также без учета различия капитальных составляющих на строительство оборудования для восстановления руды (высокотемпературные теплообменники в варианте с ВТГР, печи электроподогрева в варианте с ВВЭР/РБМК). Поэтому оценки, за исключением себестоимости электролизного водорода, относятся только к энергозатратам и производительности комплексов.

3. Показано, что в принятых схемах наиболее энергоемким является производство водорода, поглощающее около 70% энергозатрат в обоих случаях. Стоимость энергозатрат на производство водорода достигает 82% для высокотемпературного реактора и 74% для ВВЭР и РБМК.

4. Годовая производительность комплексов на основе реакторов ВТГР и ВВЭР тепловой мощностью по 1000 МВт(т) каждый при к.п.д. АЭС 40 и 30% составит

ВТГР =  $0,80 \pm 0,07$  млн. т стали/год:

ВВЭР =  $0,56 \pm 0,05$  млн. т стали/год.

5. Стоимость энергозатрат на производство стали при равной стоимости электроэнергии на обоих объектах различается на 11% в пользу высокотемпературного реактора.

6. В случае канадского варианта использования реактора, когда часть энергозатрат (подогрев руды, осуществление реакции восстановления, подогрев губчатого железа) обеспечивается теплом от сжигания природного газа, расчетная производительность комбинатов возрастает до  $0,82 \pm 0,07$  и  $0,62 \pm 0,05$  млн. т стали в год (различие определяется только к.п.д. соответствующих АЭС).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.П., Ядерная энергетика и научно-технический прогресс, в сб. "Атомной энергетике XX лет", стр. 205-213, Атомиздат, М., 1974.
2. Черняев В.А., Сметанников В.П., Радченко С.В., Макаров В.Е. О возможности использования ядерных энергетических установок в черной металлургии, "Атомная техника за рубежом", № 3, 15-20 (1974).
3. Metal Bulletin, N 5881, 29 (1974).
4. Blickwede D.J., The use of nuclear energy in steelmaking - prospects and problems. Nuclear News, N 10, 65-69 (1974).
5. Мерельман В.И. Краткий справочник химика, Гостехиздат, М.-Л., 1951.
6. Вератин У.Д. и др. Термодинамические свойства неорганических веществ, Атомиздат, М., 1965.
7. Якименко Л.М. и др. Электролиз воды, "Химия", М. (1970).
8. Кожевников И.Ю. Бескоксовая металлургия железа, "Металлургия", М. (1970).
9. Воронин Л.М. Атомные электростанции, "Электрические станции", № 4, 13-19 (1975).
10. Атомные энергетические газотурбинные установки за рубежом, НИИИнформатизма, М., 1974.
11. Махорин К.Е., Тищенко А.Н. Високотемпературные установки с кипящим слоем, "Техника", Киев, 1966.
12. Hawkes D.A. and Hosegood S.B. The high temperature gas cooled reactor: a process heat/electrical energy source for a large steelworks, Journ.Brit.Nucl.Eng.Soc., 10, N4, 308-320 (1971).
13. Fangborn J.B. and Gregory D.P. Nuclear energy requirements for hydrogen production from water, in Proceedings of the 9<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 400-404, San Francisco, Cal., 1974.
14. Russel J.L. Nuclear water splitting and the hydrogen economy, Power Engineering, No 4, 48-51 (1974).



Технический редактор Н.И.Мазаева.   Корректор Н.Н.Черемных  
Т-15784.   9.10.75 г.   Формат 60х90/8.   Уч.-изд. л. 0,70  
Тираж 244 экз.   Заказ 1295.   Цена 7 коп.   ОНТИ. ИАЭ

7 коп.