

**Нечитайло Т. П., Скоморовский С. А.**  
**T. P. Nechitaylo, S.A. Skomorovsky**

### УГОЛЬНЫЙ БИНАРНЫЙ ПАРОТУРБИННЫЙ ЭНЕРГОБЛОК ДЛЯ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

### A COAL-FIRED BINARY CYCLE STEAM POWER PLANT FOR ARCTIC REGIONS



**Нечитайло Татьяна Петровна** – бакалавр техники и технологии по направлению «Теплоэнергетика», студентка магистратуры кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, оф. 211/2; 8(4217)24-11-70. E-mail: seu@knastu.ru.

**Ms. T. P. Nechitaylo** – Bachelor of Engineering Technology, specialization: heat power engineering, ME student, Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur). Mailing address: 681013, 27 Lenin St., room 211/2, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: seu@knastu.ru



**Скоморовский Станислав Альбинович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, оф. 211/2; 8(4217) 24-11-70. E-mail: seu@knastu.ru.

**Mr. Stanislav A. Skomorovsky** – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur). Mailing address: 681013, 27 Lenin St., room 211/2, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: seu@knastu.ru

**Аннотация.** Анализируется тепловая эффективность модернизации классического паротурбинного энергоблока в бинарный энергоблок с использованием низкокипящих рабочих тел.

**Summary.** The paper considers the thermal efficiency of upgrading a classical steam-turbine power generator to a binary power plant using low-boiling mediums.

**Ключевые слова:** угольный паротурбинный энергоблок, бинарный, низкокипящие рабочие тела.

**Key words:** coal-fired steam power plant, binary cycle, low-boiling mediums.

УДК 621.165

Согласно концепции стратегии развития энергомашиностроения России [4], планируется создание и ввод в эксплуатацию пылеугольных паротурбинных энергоблоков нового поколения на суперсверхкритические параметры пара (ССКП) мощностью 330, 660, 990 МВт и с ориентировочными КПД 45 – 46 %. Предлагается дополнить этот ряд энергоблоков на ССКП докритическим энергоблоком мощностью 225 МВт [4], уровнем КПД 41 % [1]. Этот энергоблок имеет тепловую экономичность на уровне лучшего российского паротурбинного блока со сверхкритическими параметрами пара (СКП) К-800-240, удельная стоимость строительства и эксплуатации которого значительно выше.

На территории самых холодных регионов северного полушария – в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах (ФО), располагается более 50 % мощностей угольных ТЭС России. Доля добычи угля в этих округах составляет более 93 % от общероссийской. Планируется создание и дальнейшее развитие новых центров угледобычи, в том числе в Кузбассе, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. При этом доля угледобычи в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке возрастет в полтора раза с 33 % до 46 – 52 % к 2030 г., что

приведет к значительному сокращению дальности перевозки угля и повышению конкурентоспособности поставок угля на внутренний и мировой рынок [3]. По предварительным оценкам в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке доля запасов угля составляет 75 % общероссийских.

Климат Северо-Восточной Сибири суровый, со среднегодовыми температурами повсеместно ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (местами до  $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), зимой минимальные температуры могут достигать  $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а длительность безморозного периода почти на всей данной территории составляет от 60 до 90 сут. В самых густонаселенных районах Западной и Средней Сибири среднегодовые температуры около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на юге Забайкалья (Восточная Сибирь) они составляют от  $-2$  до  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Несмотря на суровые климатические условия, экономическое освоение Восточной Сибири и севера Дальнего Востока неизбежно, но для этого необходимо создавать технику, адаптированную к эксплуатации при низких температурах воздуха.

Тепловую эффективность классических паротурбинных установок электростанций можно существенно повысить, если применять бинарные циклы с использованием низкокипящих рабочих тел (НРТ) и воздушное охлаждение окружающим воздухом. Климатические условия северных регионов России при такой модернизации паротурбинных энергоблоков можно использовать как для повышения КПД, так и для устойчивости функционирования в условиях низких температур. Возможный вариант такой бинарной энергоустановки – комбинация энергоблока с турбиной К-225-12,8-3Р и энергомодуля на низкокипящем рабочем теле.

В состав основного оборудования базового энергоблока входит котельная установка с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) и турбина типа К-225-12,8-3Р производства ОАО «Ленинградский металлический завод». Основные технические характеристики турбины К-225-12,8-3Р приведены в табл. 1. Котел с ЦКС позволяет нести нагрузку от 30 до 100 % номинальной мощности, поэтому регулирование нагрузки турбины производится изменением паропроизводительности котла, что значительно увеличивает экономичность в режимах частичных нагрузок.

Таблица 1

Основные технические характеристики турбины К-225-12,8-3Р [2]

Показатель	Значение
Максимальная паропроизводительность котла, т/ч	611,4
Номинальная мощность турбины, МВт	225
Давление свежего пара, МПа	12,75
Температура свежего пара / промперегрева, $^{\circ}\text{C}$	561/564
Температура охлаждающей воды, $^{\circ}\text{C}$	12

Бинарный энергоблок получен путем модернизации турбины К-225-12,8-3Р (удалены ступени последнего восьмого отсека турбины и подогреватель низкого давления) и заменой ее конденсационной установки на энергомодуль с НРТ (см. рис. 1). Парогенератор НРТ энергомодуля подключается к выхлопу турбины после удаления ступеней восьмого отсека.

Расчет тепловой схемы К-225-12,8-3Р проводился в целях ориентировочного определения удельного расхода тепла турбоустановки, расходов и параметров пара в характерных точках турбины, параметров пара на выхлопе ЧНД до и после модернизации. Путем оценки современного уровня докритических энергоблоков были приняты: относительные внутренние КПД турбины:  $\eta_{\text{цвд}} = 0,861\%$ ,  $\eta_{\text{цсд}} = 0,918\%$  и  $\eta_{\text{цнд}} = 0,891\%$ ; КПД котла – 0,92 %; КПД транспорта теплоты – 98 %, электромеханический КПД – 98 %. Для расчета использовались приведенные в табл. 1 данные, а КПД энергоблока был принят 41 %.

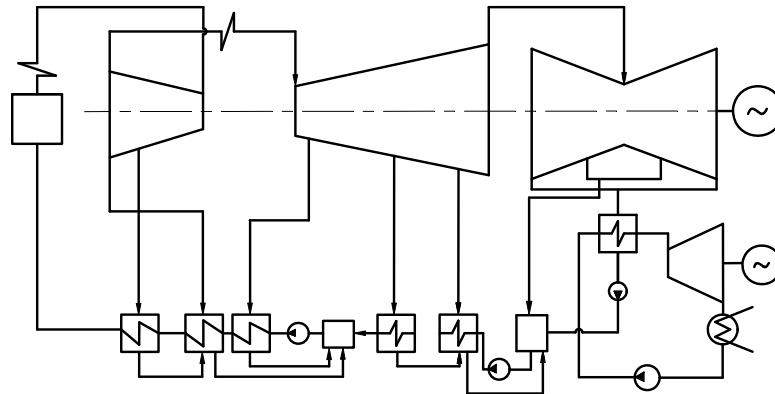


Рис. 1. Тепловая схема бинарной энергоустановки установки на базе турбоагрегата К-225-12,8-3Р

Результаты теплового расчета турбоустановки К-225-12,8-3Р следующие:

- электрическая мощность восьми отсеков до модернизации  
(на клеммах генератора)  $N_8$ , МВт .....224,8
- электрическая мощность семи отсеков после модернизации  
(на клеммах генератора)  $N_7$ , МВт .....198,5
- параметры пара на выхлопе седьмого отсека:
  - температура, °С .....65,8
  - степень сухости .....0,992

Расчеты бинарного энергомодуля проводились при следующих условиях: температура НРТ на входе в турбину  $-60$  °С; количество тепла, отданное паром в парогенераторе НРТ, 293 МВт. При выборе НРТ температура конденсации варьировалась в диапазоне от  $-10$  до  $+5$  °С, что соответствует диапазону среднегодовых температур от  $-16$  до  $-1$  °С в регионах Сибири и севера Дальнего Востока.

На сегодняшний день насчитывается всего около 300 химических соединений, которые теоретически возможно использовать в цикле паротурбинной установки [2]. Однако на практике известен опыт применения около 15 НРТ, в том числе смесей. В ходе предварительного анализа из группы разрешенных азонобезопасных НРТ были выбраны шесть рабочих тел: аммиак, бутан, пентан, пропан, хладагенты R152a и R134a. Теплофизические свойства выбранных для исследования рабочих тел обуславливают различия в тепловых схемах бинарных энергоблоков. Исходя из этого, в расчетах были рассмотрены два варианта компоновки бинарной части цикла: с регенеративным теплообменником (в том случае, если температура рабочего тела на выхлопе турбины более чем на  $10$  °С превышала температуру конденсации) и с его отключением (регенеративный теплообменник на тепловой схеме бинарной энергоустановки (см. рис. 1) не показан). Наличие регенеративного теплообменника необходимо в схемах, работающих на пентане и бутане при температурах конденсации ниже  $+5$  °С. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

С позиции термодинамической эффективности, энергомодуль на аммиаке обладает наибольшим КПД, поэтому аммиак и был выбран рабочим телом для дальнейшего исследования.

Из-за колебаний температур окружающего воздуха потребуется работа на скользких параметрах в конденсаторе и, соответственно, эффективность установки будет изменяться. Исходя из данных по среднемесячным температурам в течение года в г. Нерюнгри (южная Якутия, среднегодовая температура  $-7,1$  °С), были проведены расчеты, которые показали, что даже в самые жаркие месяцы работоспособность бинарного энергоблока не нарушается, а его среднегодовой КПД на  $4,56$  % превышает КПД исходной турбины К-225-12,8-3Р (см. рис. 3).

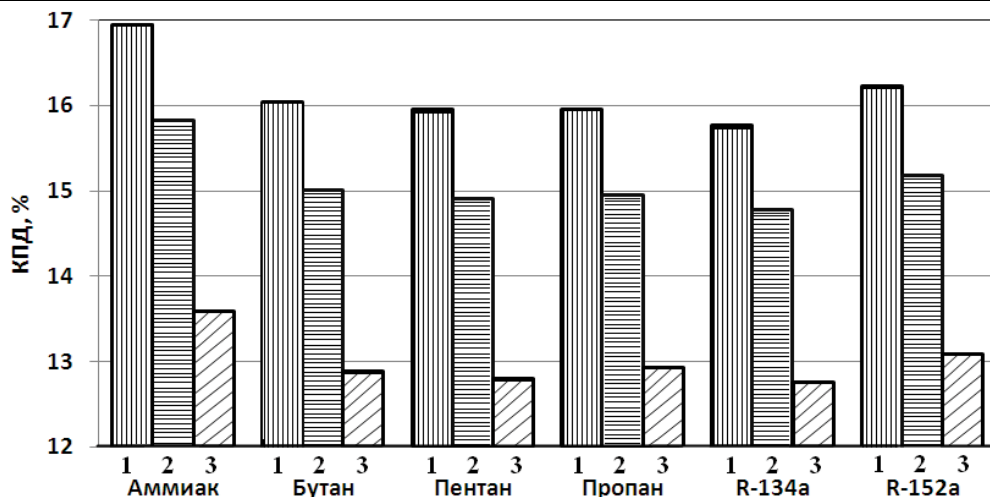


Рис. 2. КПД энергомодуля при работе на различных НРТ:

1 –  $t_k = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_k = -5\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_k = +5\text{ }^\circ\text{C}$

Среднемесячная номинальная мощность в зависимости от температуры воздуха изменяется в диапазоне от 230 до 256 МВт. При этом среднегодовая номинальная мощность составляет 249 МВт (приrost составляет более 10 % или 24 МВт).

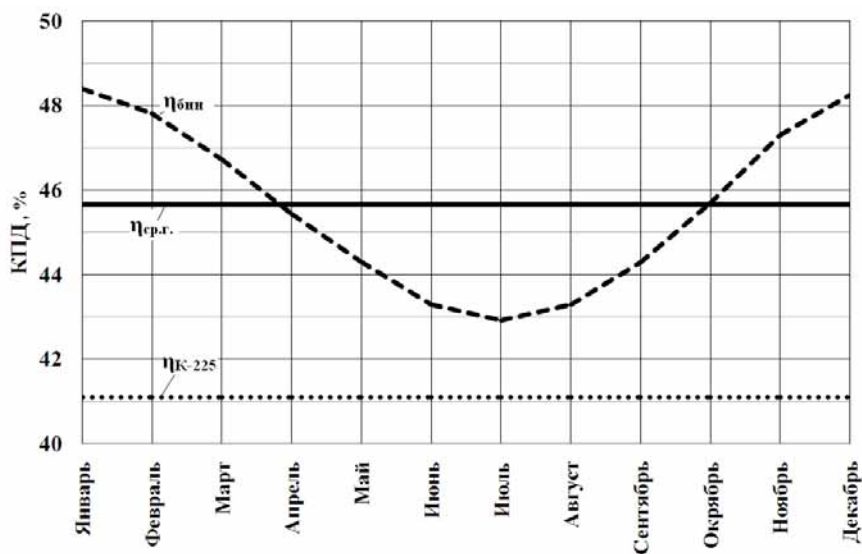


Рис. 3. Зависимости КПД энергоблока от среднемесячной температуры окружающего воздуха:  $\eta_{\text{бин}}$  – КПД бинарного энергоблока;  $\eta_{\text{ср.г.}}$  – среднегодовой КПД бинарного энергоблока;  $\eta_{\text{к-225}}$  – КПД базового энергоблока с турбиной К-225-12,8-3Р

Эффективность работы бинарного энергоблока в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха приведена на рис. 4. При изменении среднегодовой температуры от  $-2$  до  $-16\text{ }^\circ\text{C}$  приrost среднегодового КПД бинарного энергоблока по сравнению с базовым К-225-12,8-3Р лежит в диапазоне от 3,7 до 5,2 %. При строительстве таких бинарных энергоблоков в Восточной Сибири и на севере Дальнего Востока их среднегодовой КПД будет находиться в диапазоне от 44,8 до 46,3 %, что сопоставимо с КПД паротурбинных энергоблоков нового поколения на ССКП.

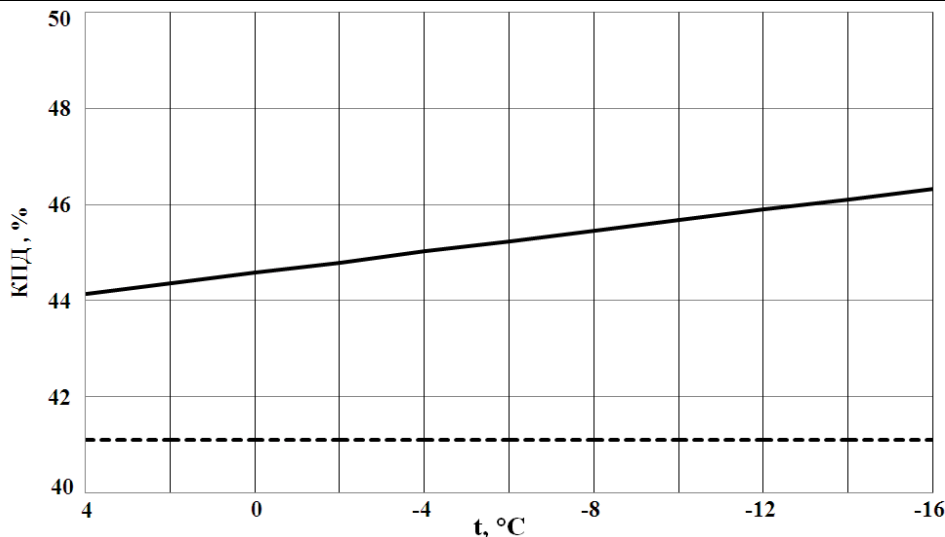


Рис. 4. Зависимость эффективности работы бинарного энергоблока в зависимости от среднегодовой температуры наружного воздуха

Несмотря на высокую эффективность энергоустановок на аммиачном рабочем теле, одним из главных их недостатков является опасность для человека в аварийной ситуации. Однако существующие технические решения позволяют сделать работу бинарного энергоблока достаточно безопасной, что подтверждается мировой практикой эксплуатации промышленных аммиачных холодильных установок большой мощности.

В перспективе при строительстве мощных угольных ТЭС в северных регионах Сибири и Дальнего Востока возможна модернизация паротурбинных энергоблоков нового поколения на ССКП в бинарные энергоблоки. В данном случае возможно достижение КПД энергоблоков порядка 50 % без повышения температуры пара выше 600...620 °С.

Использование низких температур для существенного повышения топливной экономичности тепловых электростанций в условиях крайнего Севера может позволить снизить неблагоприятное воздействие сурового климата на конкурентоспособность промышленности северных регионов России.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков, В. П. Строительство двух энергоблоков по 225 МВт с установкой котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем на Черепетской ГРЭС. Первый Тульский экономический форум «Стратегия прорыва: инновации плюс потенциал традиций» (Тула, 28-30 ноября 2006 г.) [Электронный ресурс] / В. П. Большаков. – Режим доступа: <http://www.tula-forum.ru/2006/program2006/presentation/bolshakov.ppt>.
2. Васильев, В. А. Универсальный энергомодуль на смесевом рабочем теле [Электронный ресурс] / В. А. Васильев, И. Г. Геворков, А. В. Крайнов. – СПб.: АЦИА, 1995. – Режим доступа: <http://www.eninnet.ru/lge/lgeru.htm>.
3. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. Проект [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rosugol.ru/upload/pdf/project\\_1.pdf](http://www.rosugol.ru/upload/pdf/project_1.pdf).
4. Стратегия развития энергомашиностроения Российской Федерации на 2010-2020 гг. и на перспективу до 2030 г.: приказ Минпромторга России № 206 от 22 февраля 2011 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minpromtorg.gov.ru/ministry/strategic/sectoral/15>.