

УДК 621.18:621.438(597)

UDC 621.18:621.438(597)

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ВЫБОР РОССИЙСКИХ ПАРОВЫХ ТУРБИН  
ДЛЯ РАБОТЫ В СОСТАВЕ ГАЗОПАРОВЫХ  
УСТАНОВОК ВО ВЬЕТНАМЕ. ВЛИЯНИЕ КПД  
ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-300-240-2 НА  
МОЩНОСТЬ ГПУ ВО ВЬЕТНАМЕ****SELECTION OF RUSSIAN STEAM TURBINES  
FOR THE VIETNAMESE COMBINED GAS-  
STEAM PLANT. THE INFLUENCE OF THE  
EFFICIENCY OF HIGH-PRESSURE  
CYLINDER OF STEAM TURBINE K-300-240-2  
ON THE POWER OF A GAS-STEAM PLANT  
IN VIETNAM**

Фам Ан Хоаи

аспирант

РИНЦ SPIN-код: 8315-1756

*Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого**195251, Россия, г. Санкт-Петербург,**Политехническая ул., 29*e-mail: [sdd85@mail.ru](mailto:sdd85@mail.ru)

Pham An Hoai

postgraduate student

SPIN-code: 8315-1756

*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic  
university**195251, Russia, Saint-Petersburg,**Polytechnicheskaya st., 29*e-mail: [sdd85@mail.ru](mailto:sdd85@mail.ru)

В статье рассматривается современное состояние энергетики Вьетнама и выбор новых российских паровых турбин для работы в составе газопаровых установок во Вьетнаме. Приведены результаты расчетов показателей тепловой схемы ГПУ 3x1 с мощностью 1090 МВт на базе российской ПТУ К-300-240-2 и на базе штатной ПТУ ТС2А40 Мицубиси (станция ФуМи-1, Вьетнам). Рассмотрено как влияние КПД ЦВД российской паровой турбины К-300-240-2 на КПД и мощность ГПУ 3x1 с мощностью 1090 МВт, так и повышение КПД ЦВД за счет применения сотовых уплотнений в проточных частях.

The article looks at the current state of energy in Vietnam and the selection of new Russian steam turbines for operation in combined gas-steam plant in Vietnam. The calculated results of thermal performance scheme 3x1 with combined gas-steam plant 1090 MW based on the Russian steam turbines K-330-240-2 and on the steam turbines TS2A40 Mitsubishi (station PhuMy-1, Vietnam). It also looks at the influence of the efficiency of high-pressure cylinders of Russian steam turbine K-330-240-2 on the efficiency and power of a gas-steam plant 3x1 with 1090 MW, increasing the efficiency of high-pressure cylinder of steam turbine through the use of honeycomb seals in flow part

Ключевые слова: ВЫБОР, ПАРОВАЯ ТУРБИНА, КОМБИНИРОВАННАЯ ГАЗОПАРОВАЯ УСТАНОВКА, ВЛИЯНИЕ, ПОВЫШЕНИЕ, ЦИЛИНДР ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, МОЩНОСТЬ

Keywords: SELECTION, STEAM TURBINE, COMBINED GAS-STEAM PLANT, INFLUENCE, INCREASE, HIGH-PRESSURE CYLINDER, POWER

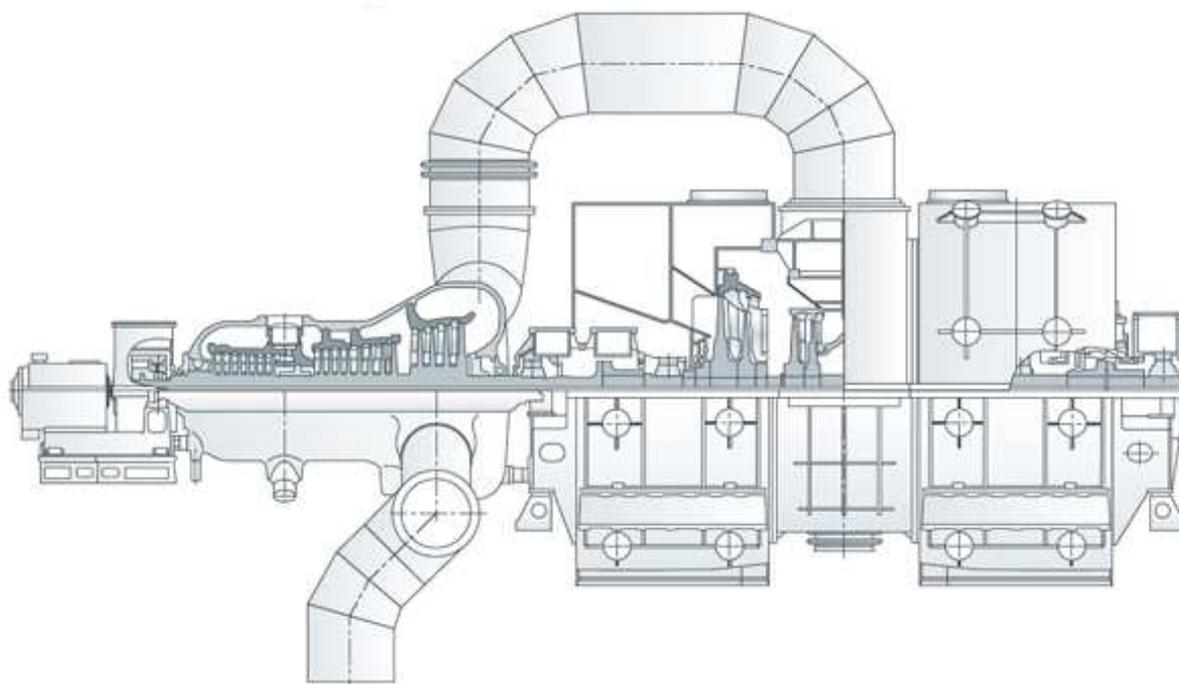
Во Вьетнаме существует необходимость в создании тепловых электростанций традиционных типов, а также внедрении перспективных комбинированных установок, обладающих высоким коэффициентом полезного действия (КПД). Решить задачу повышения выработки электроэнергии можно не только за счет строительства новых электростанций, но и путем модернизации действующих [1]. Модернизация может быть осуществлена за счет создания комбинированных газопаровых установок (ГПУ) на базе имеющихся во

Вьетнаме газотурбинных двигателей (ГТД), а также за счет применения газотурбинного комбинированного цикла с российскими паровыми турбинами. Поэтому исследования в этой области являются актуальными для Вьетнама.

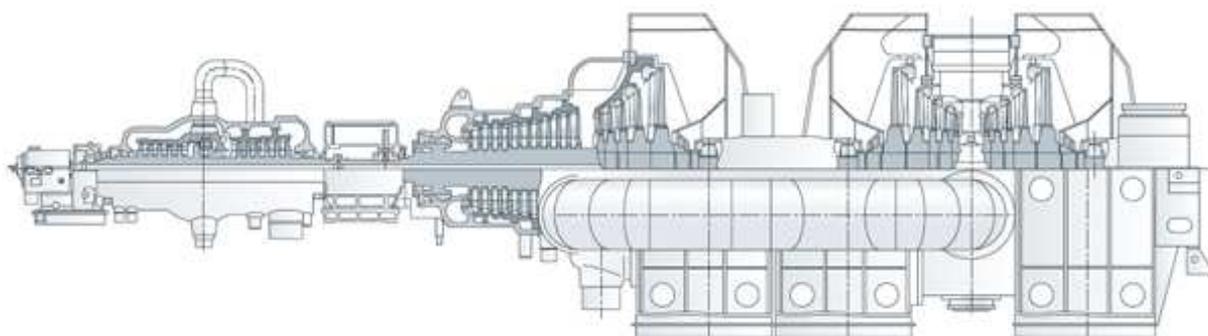
В настоящее время во Вьетнаме установлено более десятка комбинированных газопаровых установок. Комбинированные газопаровые установки во Вьетнаме состоят из трех типов: ГПУ с мощностью 450 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 750 МВт: 2 ГТ + 1 ПТ; ГПУ с мощностью 1090 МВт: 3 ГТ + 1 ПТ [2].

**Краткий обзор российских турбоустановок различных предприятий.** Для ГПУ 2x1 с мощностью 450 МВт предлагается использование паровой турбины Т-150-7,7 (ОАО «ЛМЗ»), для ГПУ 2x1 с мощностью 750 МВт предлагается использование паровой турбины К-300-23,5 (ОАО «ЛМЗ») и для ГПУ 3x1 с мощностью 1090 МВт может использоваться паровая турбина К-300-240-2 (ОАО «ЛМЗ») при реконструкции по газопаровому циклу действующих паротурбинных ТЭС во Вьетнаме [3].

Паровая турбина Т-150-7,7: Двухцилиндровая турбина без промежуточного перегрева пара, предназначена для работы в составе газопаровых установок. Цилиндр высокого давления имеет два паровпуска из котлов-утилизаторов высокого и низкого давления. Цилиндр низкого давления - двухпоточный. Турбина Т-150-7,7 - теплофикационная, имеет два регулируемых отбора пара. Регулирование давления осуществляется поворотной диафрагмой в нижнем отборе и регулирующим клапаном - в верхнем. Турбина может использоваться как при строительстве новых электростанций, так и при реконструкции по газопаровому циклу действующих паротурбинных ТЭС [3].



а)



б)

Рис. 1. Продольный разрез паровой турбины:

а - Т-150-7,7; б - К-300-240-2

Паровая турбина К-300-23,5: Трёхцилиндровая конденсационная турбина с промежуточным перегревом пара, тремя выхлопами в конденсатор и развитой системой регенеративного подогрева питательной воды. В качестве паротурбинной части блока ГПУ-750 или ГПУ-800 может использоваться паровая турбина К-300-23,5 после перевода ее на пониженные параметры пара, модернизации системы паровпуска, регулирующих ступеней, последних ступеней ЦНД, закрытия патрубков

нерегулируемых отборов и т.д. Внутренние относительные КПД частей турбины при этом практически не изменятся [4].

Паровая турбина К-300-240-2: Трёхцилиндровая конденсационная турбина без регулируемых отборов пара, номинальной мощностью 300 МВт с частотой вращения ротора 3000 об/мин, выпускаемая ОАО «ЛМЗ», предназначена для непосредственного привода генератора переменного тока типа ТВВ-320-2 и для работы в блоке с паровым котлом [5].

Таблица 1. Основные технические характеристики

Наименование показателя	Типоразмер турбины		
	Т-150-7,7	К-300-23,5*	К-300-240-2
Мощность номинальная, МВт	150	300	300
Давление пара на входе в ЦВД, МПа	7,6	16	23,5
Температура пара на входе в ЦВД, °С	510	540	540
Давление в конденсаторе, МПа	0,005	0,004	0,00705

\* параметры К-300-23,5 после перевода ее в газопаровый режим

**Сравнение результатов расчетов.** Для сравнения были выбраны три программных продукта: программа P1GPU, написанная авторам; программа КГПТУ, разработанная Морским университетом (г. Санкт-Петербург); программа GateCycle компании General Electric. Все три программы дают весьма близкие и хорошо совпадающие с опубликованными данными результаты [6,7] для схем ГПУ. Поскольку программа P1GPU не позволяет проектировать ГПУ с тремя уровнями давления в котле-утилизаторе, для дальнейших расчетов была выбрана простая и удобная при использовании программа Морского технического университета [8].

Ниже приведены результаты расчетов показателей тепловой схемы ГПУ 3x1 с мощностью 1090 МВт на базе российской ПТУ К-300-240-2 и



Температура газа за турбиной, °С	549	
КПД ГТД, %	38,2	
Степень повышения давления воздуха в компрессоре	17	
Коэффициент избытка воздуха	2,65	
<b>Паровая часть</b>		
	<b>К-330-240-2</b>	<b>ТС2А40</b>
	Россия	Япония
КПД части высокого давления, %	78	-
КПД части среднего давления, %	85	-
КПД части низкого давления, %	84	-
Давление в конденсаторе, МПа	0,00705	-
Давление в деаэраторе, МПа	0,1	-
Параметры пара за высокими контурами:		
- давление, МПа	22	15
- температура, °С	509	538
- расход, кг/с	197,3	-
Параметры пара за средними контурами:		
- давление, МПа	3,82	4,5
- температура, °С	259	-
- расход, кг/с	35,1	-
Параметры пара за низкими контурами:		
- давление, МПа	0,248	0,899
- температура, °С	224,4	280
- расход, кг/с	107,8	-
Мощность ПТ, МВт	316,3	360
<b>Мощность ГПУ, МВт</b>	<b>1033,7</b>	<b>1090*</b>

<b>КПД ГПУ, %</b>	<b>54,408</b>	<b>54,4*</b>
-------------------	---------------	--------------

\* *параметры реальной установки (станция ФуМи-1, Вьетнам)*

Как следует из сравнения полученных данных, для совершенствования и модернизации комбинированных газопаровых установок во Вьетнаме предлагается использование новых российских паровых турбин: Т-150-7,7; К-300-23,5 и К-300-240-2.

**Влияние КПД цилиндра высокого давления (ЦВД) российской паровой турбины К-300-240-2 на КПД и мощность ГПУ 3х1 (мощность порядка 1090 МВт).**

Таблица 3. Влияние КПД ЦВД паровой турбины К-300-240-2 на КПД и мощность ГПУ 3х1 (станция ФуМи-1, Вьетнам)

КПД ЦВД, %	Мощность ГПУ, МВт	КПД ГПУ, %
<b>78(ном.)</b>	<b>1033,7</b>	<b>54,408</b>
80	1034,6	54,45
84	1036,3	54,55
86	1037,2	54,59
90	1038,9	54,68
94	1040,6	54,77
96	1041,4	54,81
99	1042,7	54,88

На рис.3 и рис.4 видно, что с повышением КПД цилиндра высокого давления паровой турбины показатели установки резко возрастают. Так, повышение КПД ЦВД приводит к значительному росту КПД и мощности ГПУ, которые при  $\eta_{\text{ЦВД}} = 96\%$  достигают  $\eta_{\text{ГПУ}} = 54,81\%$  и  $N_{\text{ГПУ}} = 1041,4$  МВт.

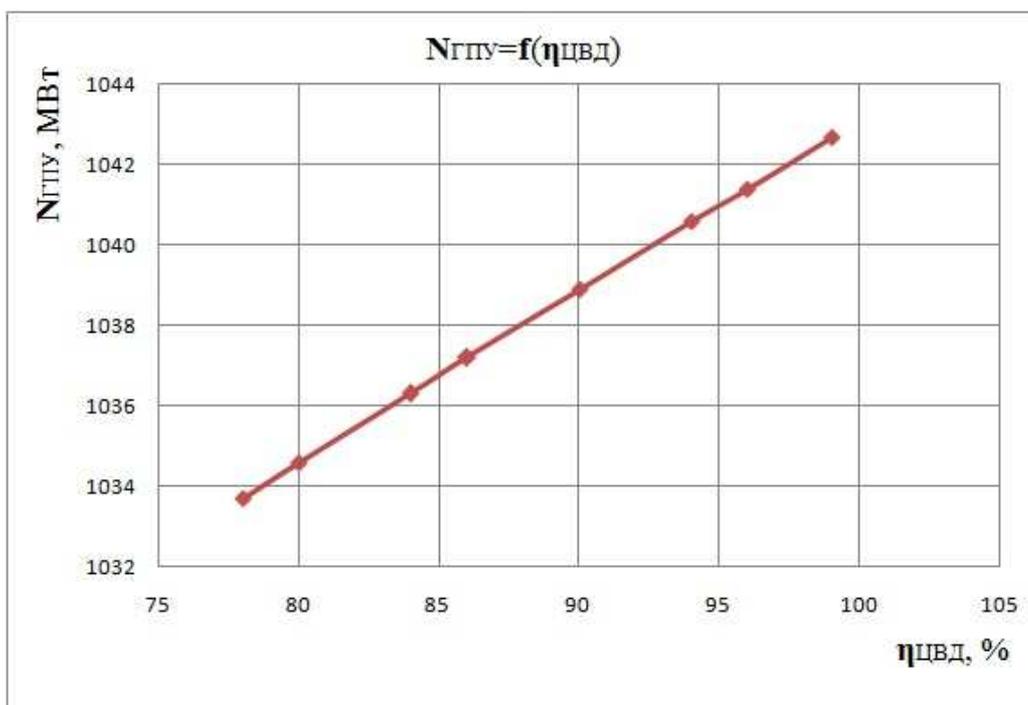


Рис. 3. Влияние КПД ЦВД паровой турбины К-300-240-2 на мощность ГПУ

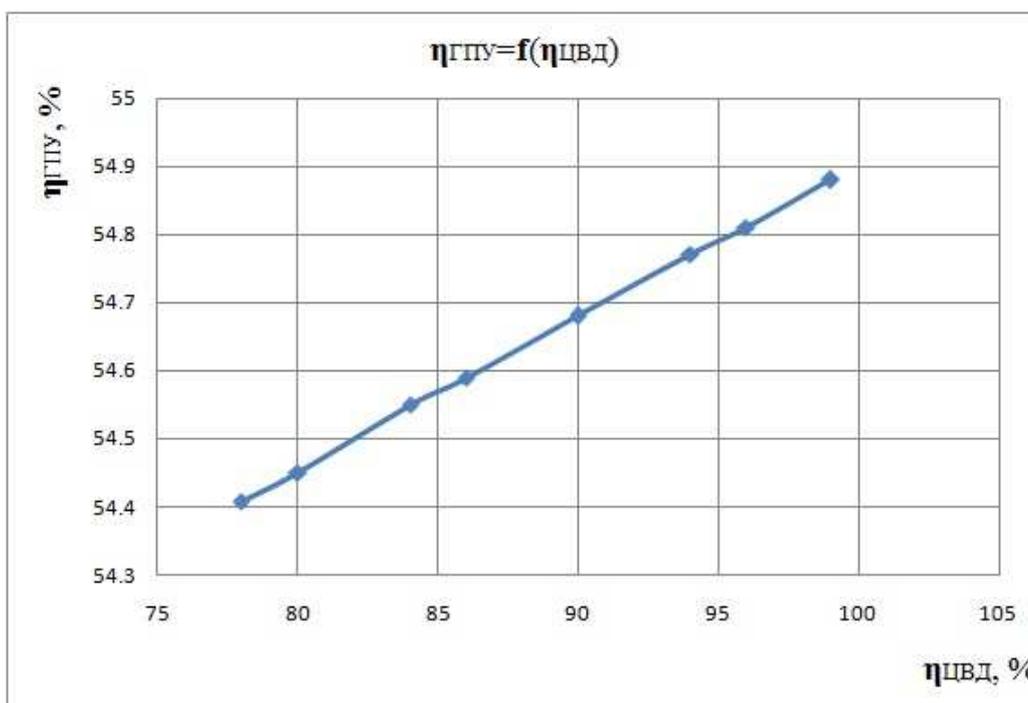


Рис. 4. Влияние КПД ЦВД паровой турбины К-300-240-2 на КПД ГПУ

**Повышение КПД цилиндра высокого давления паровой турбины за счет применения сотовых надбандажных уплотнений.**  
 Сотовые уплотнения – это усовершенствованный тип уплотнений с

использованием сотовой поверхности. Конструктивно соты имеют форму шестигранных ячеек с диаметром вписанной окружности, равной 1,5 мм. Сотоблоки изготавливаются из жаростойкой хромоникелевой фольги толщиной 0,05мм и припаиваются к вставкам, из которых собирается кольцо сотового уплотнения для последующего монтажа в проточную часть турбины.

В проточных частях паровых турбин используются четыре вида уплотнений: надбандажные, концевые, диафрагменные и средние [9].



Рис. 5. Внешний вид сотоблока и вставок сотовых уплотнений

Опыт эксплуатации паровых турбин подтверждает, что применение сотовых надбандажных уплотнений обеспечивает повышение внутреннего относительного КПД цилиндра для различных типов турбин на 0,6-1,7% от нормативного значения [10].

Для определения изменения протечек пара через надбандажные уплотнения используется методика, заключающаяся в определении значений относительного внутреннего КПД цилиндра по результатам опытов на режимах с включенной и отключенной регенерацией до и после реконструкции проточной части. Оценка эффективности реконструкции основывается на исследованном факте, определяющем, что часть высокотемпературных протечек через надбандажные уплотнения при включенной регенерации сбрасывается в соответствующие подогреватели,

что приводит к снижению температуры пара после цилиндра, следовательно, рассчитанная величина относительного внутреннего КПД цилиндра будет выше, чем аналогичные значения в опытах с отключенной регенерацией. Таким образом, по разнице температур пара за ЦВД в опытах с включенными и отключенными подогревателями высокого давления (ПВД) можно судить о величине суммарных протечек через надбандажные уплотнения, т.е. об их эффективности.

На рис.6 схематично показаны места установки сотовых уплотнений в проточной части паровой турбины [11].

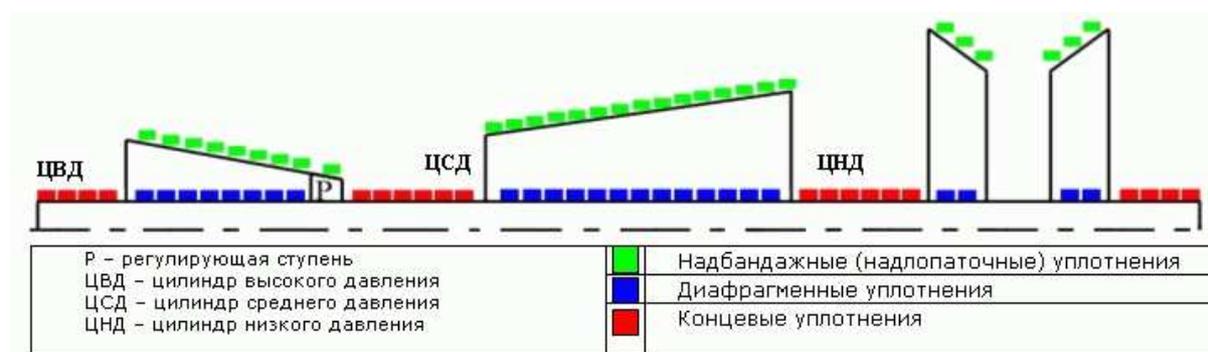


Рис. 6. Места установки сотовых уплотнений в проточной части паровой турбины.

В 2004г. в период капитального ремонта паровых турбин К-300-240 ст.№4 Каширской ГРЭС на 3-12 ст. ЦВД были установлены сотовые надбандажные уплотнения НПП "АРМС". Для оценки эффективности модернизации в 2004-2010г. выполнено 3 этапа сравнительных тепловых испытаний (до, после модернизации и через 6 лет эксплуатации перед выводом в капремонт), основные результаты представлены ниже [10].

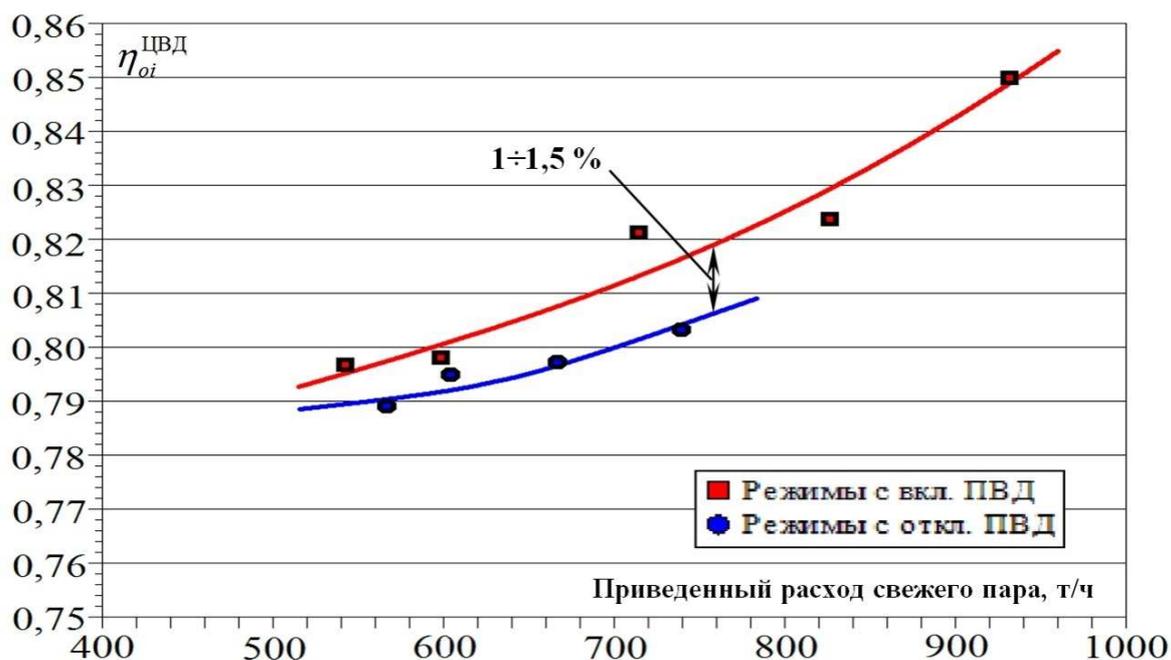


Рис. 7. Изменение внутреннего относительного КПД ЦВД турбины К-300-240, ст.№4 (I этап испытаний, 2004г.)

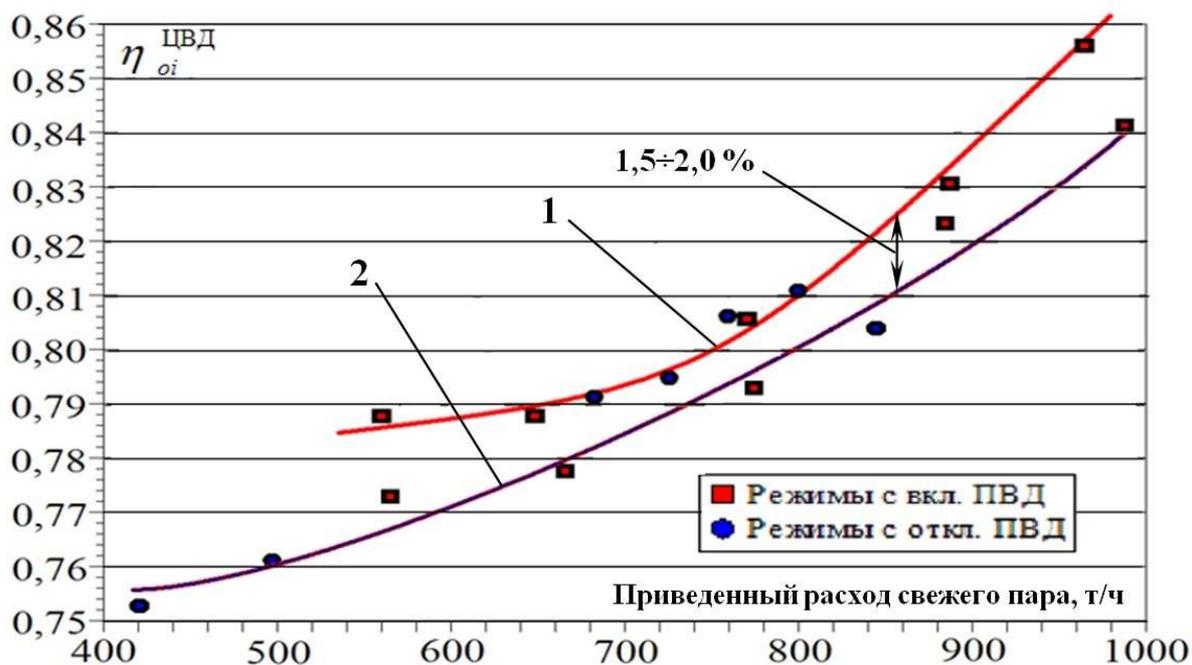


Рис. 8. Изменение внутреннего относительного КПД ЦВД турбины К-300-240, ст.№4 (II-III этапы испытаний, 2004-2009г.): 1 - после установки сотовых уплотнений (II этап испытаний); 2 - после шести лет эксплуатации сотовых уплотнений (III этап испытаний)

Анализ результатов I этапа (рис.7) испытаний показал, что расхождение значений относительного внутреннего КПД ЦВД в опытах с включенной и отключенной регенерацией до реконструкции (I этап) составляет от 1,0% до 1,5%, в то время как в опыте после реконструкции (II этап) оно близко к нулю [10].

Анализ результатов III этапа (рис.8) и сравнение с результатами, полученными во II этапе, позволяет сделать вывод о том, что расхождение значений относительного внутреннего КПД ЦВД в опытах с включенными и отключенными ПВД практически отсутствует, из чего можно сделать заключение: за шесть лет эксплуатации не произошло существенного увеличения протечек через надбандажные сотовые уплотнения. Вместе с тем, зафиксировано незначительное снижение КПД ЦВД на 1,5÷2% в абсолютных величинах, причинами которого явились эрозионный износ лопаток регулирующей ступени, а также механические повреждения рабочих и направляющих лопаток в проточной части ЦВД.

### **Заключение**

1. Для совершенствования и модернизация комбинированных газопаровых установок во Вьетнаме предлагается использование новых российских паровых турбин: Т-150-7,7; К-300-23,5 и К-300-240-2.

2. Выполненные расчеты показали значительный рост КПД и мощности комбинированных газопаровых установок при увеличении КПД цилиндра высокого давления паровой турбины.

3. Результаты представленных тепловых испытаний паровых турбин К-300-240 ст.№4 Каширской ГРЭС подтверждают, что применение сотовых надбандажных уплотнений в проточных частях позволяет повысить относительный внутренний КПД ЦВД за счёт снижения перетоков пара в

уплотнениях, при этом, в течение межремонтного периода сохраняются стабильными термодинамические характеристики цилиндра.

### Список литературы

1. Институт энергетики Вьетнама [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ievn.com.vn>
2. **Фам А.Х.** Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама / А.Х. Фам, А.В. Рассохин, К.Д. Андреев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. – № 1(166). – С. 32–35.
3. Открытое акционерное общество «Силовые машины» (ОАО «СМ»): Паровые турбины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.power-m.ru/products/>
4. **Мельников Ю.В.** Анализ технических решений по вводу ПГУ для замены блоков мощностью 300 МВт / Ю.В. Мельников, А.В. Мошкарин // Теплоэнергетика. 2009. – № 9. – С. 19–30.
5. **Фаддеев И.П.** Паровая конденсационная турбины К-300-240-2: Методическое пособие для студентов дневного и вечернего отделения / И.П. Фаддеев, В.А. Рассохин. – Л.: Турбиностроение, 1984. – 11 с.
6. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростаций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанева, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Издательство МЭИ, 2009. – 584 с.
7. **Трухний А.Д.** Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа: Методическое пособие по курсу «Энергетические установки» / А.Д. Трухний, С.В. Петрунин. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 24 с.
8. **Фам А.Х.** Расчетный анализ тепловой схемы парогазовой установки для энергетики Вьетнама / А.Х. Фам, А.В. Рассохин, К.Д. Андреев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. – № 2(195). – С. 34–40.
9. Научно-производственное предприятие «АРМС»: Основные сведения о сотовых уплотнениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.armstech.ru/cat/osn\\_sved\\_o\\_sotah/](http://www.armstech.ru/cat/osn_sved_o_sotah/)
10. Научно-производственное предприятие «АРМС»: Оценка эффективности внедрения сотовых надбандажных уплотнений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti\\_vnedrenija\\_sotovykh\\_uplotnenijj/](http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti_vnedrenija_sotovykh_uplotnenijj/)
11. Предприятие ООО «Статэнком-энерго»: Повышение эксплуатационной надежности и экономичности паровых турбин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://se-energo.ru/article/art3.html>

### References

1. Institut jenergetiki Vietnama [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.ievn.com.vn>
2. **Fam A.H.** Sostojanie i perspektivy razvitija jenergetiki V'etnama / A.H. Fam, A.V. Rassohin, K.D. Andreev // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2013. – № 1(166). – S. 32–35.
3. Otkrytoe akcionernoe obshhestvo «Silovye mashiny» (OAO «SM»): Parovye turbiny [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.power-m.ru/products/>

4. **Mel'nikov Ju.V.** Analiz tehniceskikh reshenij po vvodu PGU dlja zameny blokov moshhnost'ju 300 MVt / Ju.V. Mel'nikov, A.V. Moshkarin // Teplojenergetika. 2009. – № 9. – S. 19–30.
5. **Faddeev I.P.** Parovaja kondensacionnaja turbiny K-300-240-2: Metodicheskoe posobie dlja studentov dnevnogo i vechernego otdelenija / I.P. Faddeev, V.A. Rassohin. – L.: Turbinostroenie, 1984. – 11 s.
6. **Canev S.V.** Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh jelektrostantsij: uchebnoe posobie dlja vuzov / S.V. Caneva, V.D. Burov, A.N. Remezov. – M.: Izdatel'stvo MJeI, 2009. – 584 s.
7. **Truhnij A.D.** Raschet teplovyh shem parogazovyh ustanovok utilizacionnogo tipa: Metodicheskoe posobie po kursu «Jenergeticheskie ustanovki» / A.D. Truhnij, S.V. Petrunin. – M.: Izdatel'stvo MJeI, 2001. – 24 s.
8. **Fam A.H.** Raschetnyj analiz teplovoj shemy parogazovoj ustanovki dlja jenergetiki V'etnama / A.H. Fam, A.V. Rassohin, K.D. Andreev // Nauchno-tehniczeskie vedomosti SPbPU. 2014. – № 2(195). – S. 34–40.
9. Nauchno-proizvodstvennoe predprijatie «ARMS»: Osnovnye svedenija o sotovyh uplotnenijah [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.armstech.ru/cat/osn\\_sved\\_o\\_sotah/](http://www.armstech.ru/cat/osn_sved_o_sotah/)
10. Nauchno-proizvodstvennoe predprijatie «ARMS»: Ocenka jeffektivnosti vnedrenija sotovyh nadbandazhnyh uplotnenij [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti\\_vnedrenija\\_sotovykh\\_uplotnenij/](http://www.armstech.ru/cat/jeffektivnosti_vnedrenija_sotovykh_uplotnenij/)
11. Predprijatie OOO «Statjenkom-jenergo»: Povyszenie jekspluatacionnoj nadezhnosti i jekonomichnosti parovyh turbin [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://se-energo.ru/article/art3.html>