

УДК 536.24(075.8)

**ОБ ИСКЛЮЧЕНИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА
В ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ**

А.А. Вассерман

д.т.н., профессор кафедры

«Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация»

Одесский национальный морской университет

Аннотация. *Рассматривается вопрос о возможности исключения промежуточного перегрева пара в паротурбинных установках (ПТУ). Для этого определяются значения максимальной температуры пара, при которых можно бы было не использовать его промежуточный перегрев в ПТУ. Приведены результаты расчётов максимальной температуры пара при начальном давлении 5, 10 и 15 МПа и давлении конденсации 0,004, 0,005 и 0,006 МПа. Анализ этих результатов показал, что исключение промежуточного перегрева пара в ПТУ возможно только при начальном давлении пара до 5 МПа.*

Ключевые слова: *паротурбинная установка, промежуточный перегрев пара, цикл Ренкина, температура и давление пара, степень сухости пара, процесс расширения, давление конденсации.*

УДК 536.24(075.8)

**ПРО ВИКЛЮЧЕННЯ ПРОМІЖНОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ
В ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВКАХ**

О.А. Вассерман

д.т.н., професор кафедри

«Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»

Одеський національний морський університет

Анотація. *Розглядається питання про можливість виключення проміжного перегріву пари в паротурбінних установках (ПТУ). Для цього визначаються значення максимальної температури пари, при яких можна було б не використовувати його проміжний перегрів в ПТУ. Наведені результати розрахунків максимальної температури пари при початковому тиску 5, 10 і 15 МПа та тиску конденсації 0,004, 0,005 і 0,006 МПа. Аналіз цих результатів показав, що виключення проміжного перегріву пари в ПТУ можливо тільки при початковому тиску пари до 5 МПа.*

Ключові слова: *паротурбінна установка, проміжний перегрів пари, цикл Ренкіна, температура і тиск пари, степінь сухості пари, процес розширення, тиск конденсації.*

© Вассерман А.А., 2019

UDC 536.24(075.8)

ABOUT EXCLUSION INTERMEDIATE OVERHEATING OF VAPOR
AT STEAM-TURBINE PLANTS

A.A. Vasserman

PhD, Professor of department
«Ships energetic plants and technical operation»

Odessa national maritime university

Abstract. *The possibility of exclusion intermediate overheating of vapor at steam-turbine plants (STP) is considered. For this aim values of maximum temperature of vapor are determined at which the intermediate overheating of vapor at STP may be not used. The results of calculations of maximum temperature of vapor at initial pressures 5, 10 and 15 MPa and condensation pressures 0,004, 0,005 and 0,006 MPa are presented. The analysis of these results showed, that exclusion of intermediate overheating of vapor at STP is possible only at initial pressure of vapor up to 5 MPa.*

Keywords: *steam-turbine plant, intermediate overheating of vapor, Rankine cycle, temperature and pressure of vapor, degree of vapor dryness, process of expansion, condensation pressure.*

Введение. Современные паротурбинные установки (ПТУ) работают при высоком начальном давлении пара. Поэтому для обеспечения приемлемого значения степени сухости пара в конце расширения в турбине в них применяется однократный, а иногда и двукратный промежуточный перегрев пара. Отмеченное обстоятельство усложняет конструкцию установки, поэтому в настоящей статье рассматривается вопрос о возможности исключения промежуточного перегрева пара в ПТУ.

Целью статьи является определение при заданных значениях начального давления пара и давления конденсации значений максимальной температуры пара, при которых можно было бы не использовать его промежуточный перегрев в ПТУ.

Изложение основного материала. При отказе от применения промежуточного перегрева пара цикл ПТУ превратится в цикл Ренкина, анализу которого посвящено много работ, например [1-4]. В этом цикле при фиксированном значении начального давления пара снижение его начальной температуры уменьшает степень сухости пара x_2 в конце расширения. Это иллюстрирует рис. 1, где процессу расширения пара, изображённому штриховыми линиями, соответствует меньшее значение начальной температуры, и процесс заканчивается при меньшем значении степени сухости.

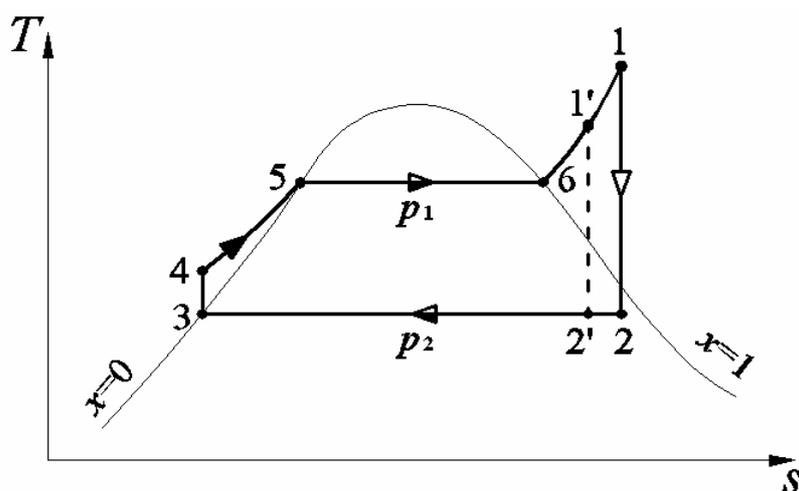


Рис. 1. Взаимосвязь начальных параметров пара и его степени сухости x_2

Известно, что значение x_2 не должно быть меньше 0,86, так как капли воды, возникающие в паре при уменьшении степени сухости, вызывают эрозию лопаток последних ступеней турбины и уменьшение её относительного КПД. Поэтому минимальное возможное значение начальной температуры пара при заданном начальном давлении будет соответствовать предельному значению степени сухости $x_2 = 0,86$.

Не исключено, что в перспективе совершенствование конструкции и материалов лопаток турбин позволит несколько уменьшить предельное значение степени сухости пара в конце расширения. Из рис. 1 видно, что при этом снизится значение начальной температуры пара, поэтому целесообразно провести дополнительные расчёты при значении степени сухости 0,84.

С другой стороны, при увеличении давления конденсации пара значение энтропии, соответствующее фиксированной степени сухости, будет уменьшаться. Это приведёт к некоторому уменьшению максимальной температуры, соответствующей заданному начальному давлению пара, что показано на рис. 2. Здесь в цикле, изображённом штриховыми линиями, максимальная температура пара ниже, чем во втором цикле. В связи с отмеченным обстоятельством целесообразно исследовать также зависимость между максимальными значениями давления и температуры в цикле Ренкина при нескольких встречающихся в паротурбинных установках значениях давления конденсации пара и значениях степени сухости $x_2 = 0,84$ и $x_2 = 0,86$.

Для исследования взаимосвязи между максимальными значениями параметров пара были приняты значения начального давления 5, 10 и 15 МПа, давления конденсации 0,004, 0,005 и 0,006 МПа и указанные выше значения степени сухости пара в конце расширения. При расчётах использованы данные о термодинамических свойствах воды и водяного пара из таблиц М.П. Вукаловича и соавторов [5]. Результаты расчётов представлены в таблице.

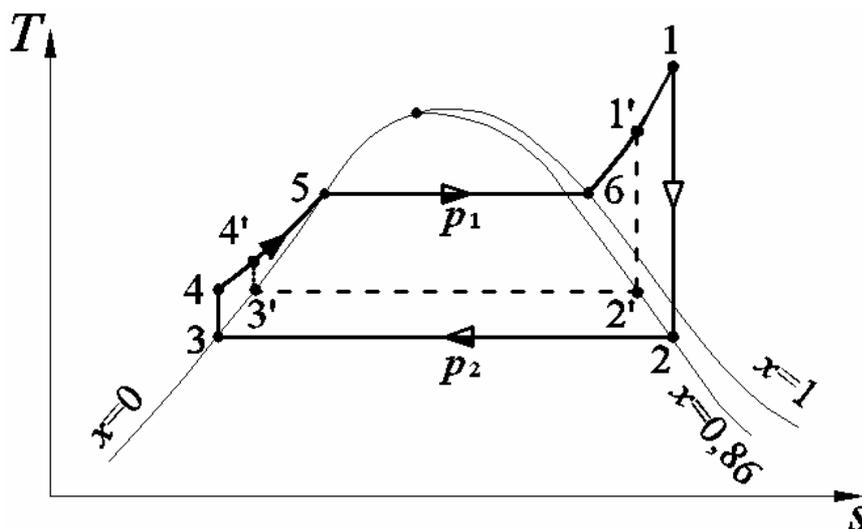


Рис. 2. Взаимосвязь начальных параметров пара и давления конденсации

Таблица

Максимальные значения температуры пара, °С
при степени сухости $x_2 = 0,84$ и $x_2 = 0,86$

Давление конденсации, МПа	Начальное давление пара, МПа					
	5		10		15	
	$x_2 = 0,84$	$x_2 = 0,86$	$x_2 = 0,84$	$x_2 = 0,86$	$x_2 = 0,84$	$x_2 = 0,86$
0,004	572	633	706	773	792	862
0,005	551	609	683	747	768	835
0,006	534	591	665	727	748	814

Анализируя данные таблицы, можно установить следующее:

– более высокому начальному давлению пара соответствует более высокое значение его максимальной температуры;

– при повышении начального давления пара от 5 до 15 МПа и $x_2 = 0,86$ соответствующая максимальная температура увеличивается на 229 °С при давлении конденсации 0,004 МПа и на 223 °С при давлении конденсации 0,006 МПа, а при $x_2 = 0,84$ рост температуры меньше примерно на 10 °С;

– при повышении давления конденсации от 0,004 до 0,006 МПа и $x_2 = 0,86$ максимальная температура пара уменьшается на 42 °С при начальном давлении пара 5 МПа и на 48 °С при давлении пара 15 МПа, а при $x_2 = 0,84$ это изменение меньше на 4 °С;

– отмеченные изменения температуры пара почти не зависят от изменения начального давления пара и давления конденсации;

– изменение давления конденсации пара существенно влияет на его максимальную температуру, чем изменение начального давления, если учесть интервалы изменения этих параметров.

Приведенные в таблице значения начальной температуры пара при давлениях 10 и 15 МПа выше тех, которые используются в современных ПТУ в связи с ограниченной жаропрочностью трубок котлов. Вероятно в будущем при использовании для этих трубок более совершенных материалов, сохраняющих прочность при высоких температурах, можно будет исключить промежуточный перегрев пара при начальном давлении выше 5 МПа.

Выводы. Расчёт цикла Ренкина при нескольких значениях начального давления пара и давления конденсации позволил определить максимальные значения температуры пара, соответствующие его степени сухости 0,84 и 0,86 в конце расширения в паровой турбине. Выполнена количественная оценка увеличения максимальной температуры пара при повышении его начального давления и её уменьшения при повышении давления конденсации. Показано, что в настоящее время исключение промежуточного перегрева пара в паротурбинных установках возможно только при начальном давлении пара до 5 МПа в связи с ограниченной жаропрочностью трубок котлов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Техническая термодинамика* / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 496 с.
2. *Техническая термодинамика* / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М.: Энергия, 1968. – 496 с.
3. *Лекции по технической термодинамике* / Я.З. Казавчинский. – М.: Транспорт, 1970. – 275 с.

4. *Термодинамічні процеси та цикли в реальному газі / О.А. Вас-серман, О.Г. Слинко. – Одеса: Фенікс, 2015. – 194 с.*
5. *Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М.П. Вукалович, С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Изд-во Стандартов. 1969. – 408 с.*

Стаття надійшла до редакції 20.12.2018

Рецензенти:

доктор технічних наук, завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Р.А. Варбанець**

кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Суднова теплоенергетика» Національного університету Одеська морська академія **О.В. Кіріс**