

УДК 536.24(075.8)

**ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МАКСИМАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ
ПАРАМЕТРОВ ПАРА В ЦИКЛЕ РЕНКИНА**

А.А. Вассерман

доктор технических наук, профессор кафедры
«Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация»

Одесский национальный морской университет

***Аннотация.** Рассматривается зависимость между максимальными значениями температуры и давления пара в цикле Ренкина при минимально допустимом значении степени сухости пара в конце расширения. Также исследуется зависимость между максимальными значениями этих параметров при изменении давления конденсации пара. Приведены результаты расчётов максимального давления пара при начальных температурах 400, 450 и 500 °С и давлениях конденсации 0,004, 0,005 и 0,006 МПа и выполнен анализ этих результатов.*

***Ключевые слова:** цикл Ренкина, температура и давление пара, допустимая степень сухости пара, процесс расширения, давление конденсации.*

УДК 536.24(075.8)

**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ МАКСИМАЛЬНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ
ПАРАМЕТРІВ ПАРИ В ЦИКЛІ РЕНКІНА**

О.А. Вассерман

доктор технічних наук, професор кафедри
«Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація»

Одеський національний морський університет

***Анотація.** Розглядається залежність між максимальними значеннями температури та тиску пари в циклі Ренкіна при мінімально допустимому значенні степені сухості пари наприкінці розширення. Також досліджується залежність між максимальними значеннями цих параметрів при зміні тиску конденсації. Наведені результати розрахунків максимального тиску пари при початкових температурах 400, 450 і 500 °С і тисках конденсації 0,004, 0,005 і 0,006 МПа і виконаний аналіз цих результатів.*

***Ключові слова:** цикл Ренкіна, температура і тиск пари, допустима степені сухості пари, процес розширення, тиск конденсації.*

UDC 536.24(075.8)

MUTUAL RELATION BETWEEN MAXIMUM VALUES
OF VAPOR PARAMETERS AT RANKINE CYCLE

A.A. Vasserman

the doctor of engineering sciences, professor of department
the «Ship power settings and technical exploitation»

Odessa National Maritime University

Abstract. *Dependence between maximum values of temperature and pressure of vapor at Rankine cycle is considered at minimum admissible degree of vapor dryness at end of expansion. Dependence between maximum values of these parameters at change of condensation pressure is investigated also. Results of calculations of maximum vapor pressure at initial temperatures 400, 450 and 500°C and condensation pressures 0,004, 0,005 and 0,006 MPa are presented and analysis of these results is fulfilled.*

Keywords: *Rankine cycle, temperature and pressure of vapor, admissible degree of vapor dryness, process of expansion, condensation pressure.*

Введение. Цикл Ренкина как базовый цикл паротурбинных установок подробно анализируется в литературе, в частности, в работах [1-4]. Однако вопрос о возможном максимальном значении давления водяного пара в цикле при фиксированной максимальной температуре не рассматривается, хотя представляет научный и практический интерес. Поэтому в настоящей статье исследуется взаимосвязь между максимальными значениями начальных параметров пара в цикле Ренкина.

Целью статьи является установление соотношения между максимальной температурой пара в цикле Ренкина и соответствующим максимальным давлением при встречающихся часто в паротурбинных установках значениях давления конденсации.

Изложение основного материала. При анализе цикла Ренкина можно установить, что при фиксированном значении начальной температуры пара рост начального давления смещает процесс расширения пара в область меньших значений энтропии, то есть приводит к уменьшению значения степени сухости пара x_2 в конце расширения. Это иллюстрирует рис. 1, где на диаграмме T,s показаны два варианта цикла Ренкина. Циклу, изображённому штриховыми линиями, соответствует более высокое значение начального давления, и процесс расширения пара в этом цикле заканчивается при меньшем значении степени сухости.

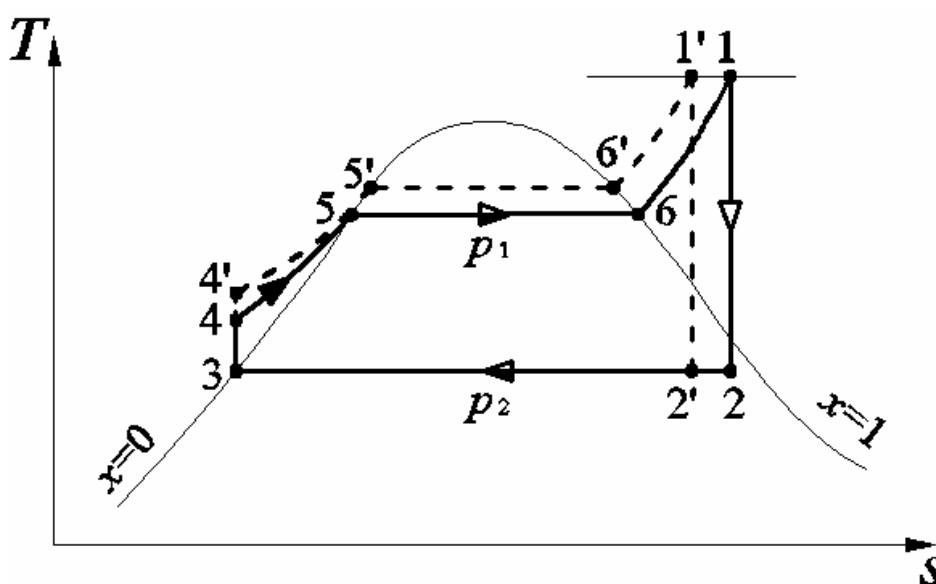


Рис. 1. Взаимосвязь начальных параметров пара и его степени сухости x_2

В то же время известно, что значение x_2 не должно быть ниже 0,86, так как иначе будет наблюдаться эрозия лопаток последних ступеней турбины под влиянием капель воды, появляющихся в паре при уменьшении степени сухости, и существенное уменьшение относительного КПД турбины. Поэтому максимальное возможное значение начального давления пара при заданной начальной температуре будет соответствовать указанному предельному значению степени сухости.

С другой стороны, при увеличении значения давления конденсации пара значение энтропии, соответствующее степени сухости 0,86, будет уменьшаться. Это приведёт к некоторому росту максимального давления, соответствующего заданной начальной температуре пара, что показано на рис. 2. На этом рисунке, как и на предыдущем, в цикле, изображённом штриховыми линиями, начальное давление выше, чем во втором цикле. В связи с отмеченным обстоятельством целесообразно исследовать также зависимость между максимальными значениями температуры и давления в цикле Ренкина при нескольких возможных в паротурбинных установках значениях давления конденсации пара.

Для исследования взаимосвязи между максимальными значениями параметров пара были приняты значения начальной температуры 400, 450 и 500 °С и давления конденсации 0,004, 0,005 и 0,006 МПа. При расчётах использованы данные о термодинамических свойствах воды и водяного пара из фундаментальных таблиц М.П. Вукаловича и соавторов [5]. Результаты расчётов представлены в таблице.

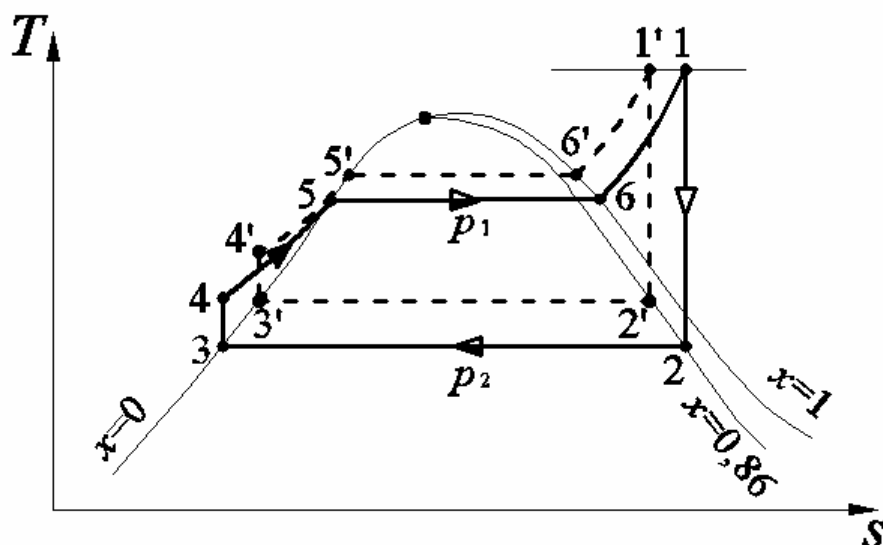


Рис. 2. Взаимосвязь начальных параметров пара и давления конденсации

Таблица

Максимальные значения давления пара, МПа,
при степени сухости $x_2 = 0,86$

Давление конденсации, МПа	Начальная температура пара, °С		
	400	450	500
0,004	1,285	1,771	2,395
0,005	1,457	2,004	2,715
0,006	1,612	2,217	3,000

Анализируя данные таблицы, можно установить следующее:

– более высокой начальной температуре пара соответствует более высокое значение его максимального давления;

– при повышении начальной температуры пара от 400 до 500 °С соответствующее максимальное давление пара увеличивается на 1,110 МПа при давлении конденсации 0,004 МПа и на 1,388 МПа при давлении конденсации 0,006 МПа;

– при повышении давления конденсации от 0,004 до 0,006 МПа максимальное давление пара возрастает на 0,327 МПа при начальной температуре пара 400 °С и на 0,605 МПа при температуре пара 500 °С;

– в выбранных интервалах значений начальной температуры пара и давления конденсации изменение температуры существенно влияет на максимальное давление пара, чем изменение давления.

Приведенные в таблице значения начального давления пара ниже тех, которые встречаются в большинстве современных паротурбинных установок. Однако в этих установках при высоком начальном давлении пара используется более сложный цикл, который включает однократный либо даже двукратный промежуточный перегрев пара, увеличивающий степень сухости пара в конце расширения в турбине.

Выводы. Расчёт цикла Ренкина при нескольких значениях начальной температуры и давления конденсации пара, характерных для паротурбинных установок, позволил определить максимальные значения давления пара, соответствующие его степени сухости в конце расширения, равной 0,86. Выполнена количественная оценка увеличения максимального давления пара при повышении его начальной температуры и давления конденсации.

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. Вассерман, 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. Стандартов, 1969. – 408 с.*

Стаття надійшла до редакції 10.12.2018

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**