

УДК 621.165:532.6

А. В. РУСАНОВ¹, Н. В. ПАЩЕНКО¹, Р. А. РУСАНОВ²¹ *Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина*² *Институт проточных машин им. Р. Шевальского Польской академии наук, Гданьск, Польша*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВЯЗКИХ ТЕЧЕНИЙ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТУРБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

В статье представлены результаты численных исследований в нескольких проточных частях турбин с использованием различных уравнений состояния рабочего тела: совершенного газа, Таммана, Ван-дер-Ваальса, Беннедикта-Вебба-Рубина, IAPWS-95. 3D расчеты выполнены с помощью программного комплекса IPRFlow, который является развитием программ FlowER и FlowER-U. Показано, что для проведения предварительных расчетов, не требующих большой вычислительной точности, целесообразно применять простые уравнения состояния с последующим выполнением поверочных расчетов с использованием уравнений состояния, более точно согласующихся с реальными свойствами рабочих тел.

Ключевые слова: уравнение состояния, проточная часть, расчетные исследования, пространственные вязкие течения.

Введение

В последние годы при проектировании и модернизации проточных частей энергетических турбин все чаще применяются методы моделирования пространственных вязких турбулентных течений. Результаты, получаемые с применением этих методов, обладают достаточной точностью и высокой информативностью (при условии корректного выполнения расчетов).

Важной составляющей численных моделей пространственных течений является способ описания свойств рабочих тел. Для этих целей используются уравнения состояния, от выбора которых существенно зависит достоверность получаемых результатов. В настоящее время наибольшее распространение получили уравнения состояния совершенного газа [1], Таммана [2] и Ван-дер-Ваальса [3]. Уравнение совершенного газа достаточно точно описывает состояние газообразного рабочего тела в относительно небольших диапазонах изменения термодинамических величин. Уравнение Таммана применимо для более широкого диапазона процессов, происходящих в газах и, в качестве первого приближения, может быть использовано при моделировании течений жидкости. Термическое уравнение Ван-дер-Ваальса описывает как жидкое, так и газообразное состояние рабочего тела и качественно правильно отслеживает фазовые переходы, а также является удовлетворительным с точки зрения вычислительной эффективности. Эти уравнения по-

зволяют корректно моделировать газодинамические процессы при относительно небольших тепловых перепадах в рассматриваемой области течения.

В случае, если моделируемое течение сопровождается фазовыми переходами (например, в цилиндрах низкого давления и конденсаторах паровых турбин ТЭС и ТЭЦ, а также проточных частях турбин АЭС) либо выполняется сквозной расчет проточной части с существенными изменениями параметров пара, необходимо относительно точно учитывать термодинамические свойства рабочего тела. В данном случае для описания реальных свойств воды и водяного пара используются уравнения состояния, основанные на уравнении Майера и Богомолова [3]. На сегодняшний день наиболее точно описывающими реальные термодинамические свойства рабочих тел, в том числе воды и водяного пара, являются уравнения Беннедикта-Вебба-Рубина [4] и уравнения IAPWS-95 [5].

При проектировании и модернизации проточных частей турбин необходимо выполнение большого количества 3D расчетов, требующих значительных вычислительных затрат, и, соответственно, использование сложных уравнений состояния увеличивает время проведения этих расчетов.

В статье представлены результаты численных исследований в нескольких проточных частях турбин с использованием различных уравнений состояния рабочего тела. Показано, что для проведения предварительных расчетов целесообразно применение простых уравнений состояния рабочего тела с

последующим выполнением поверочных расчетов с использованием уравнений состояния, более точно согласующихся с реальными свойствами рабочих тел.

Метод расчета проточных частей

Численные исследования трехмерных течений пара в проточных частях паровых турбин проводились с применением программного комплекса *IPMFlow*, который является развитием программ *FlowER* и *FlowER-U* [6, 7]. Математическая модель комплекса основана на численном интегрировании осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием неявной квази-монотонной *ENO*-схемы повышенной точности и двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности *SST* Ментера. В программном комплексе *IPMFlow* применяются уравнения состояния совершенного газа, Таммана, Ван-дер-Ваальса с постоянными и переменными теплоемкостями, IAPWS-95 [8], а также модифицированное уравнение Беннедикта-Вебба-Рубина с 32 членами [9].

Результаты расчетов, получаемые с помощью программного комплекса *IPMFlow*, обладают необходимой достоверностью как по качественной структуре течения, так и по количественной оценке характеристик изолированных турбинных решеток и проточных частей турбомашин в целом [10, 11].

ЦНД паровой турбины мощностью 360 МВт

Выполнены расчеты пространственного течения пара в отсеке низкого давления пятиступенчатой паровой турбины мощностью 360 МВт (рис. 1) с использованием уравнения состояния совершенного газа с постоянными удельными теплоемкостями (расчет 1), уравнения состояния Ван-дер-Ваальса (расчет 2) и уравнений IAPWS-95 (расчет 3). Для задания граничных условий на входе и выходе из расчетной области брались данные, полученные в натурном эксперименте Марчинковским и др. [12]: на входе – полное давление 519 кПа, полная температура 539 К; на выходе – статическое давление 8,6 кПа. Исходные данные для моделирования отборов и протечек были определены в работе [13] по одномерной методике [14]. Расчеты проводились на структурированной сетке *H*-типа, содержащей около 4 млн. ячеек.

В табл. 1 приведены интегральные характеристики потока за третьей, четвертой и пятой ступенями турбины, полученные экспериментально [12] и численно [15].

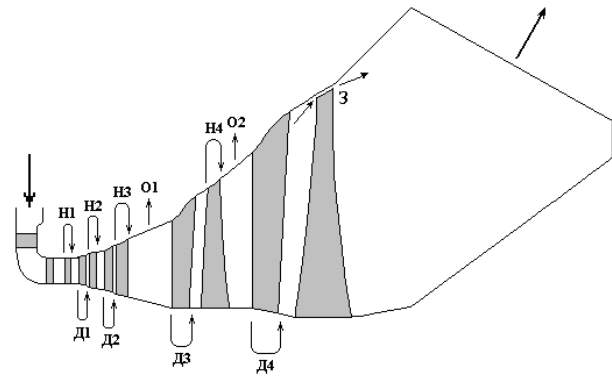


Рис. 1. Меридиональное сечение пятиступенчатой проточной части низкого давления паровой турбины мощностью 360 МВт. Схема протечек и отборов: О – регенеративные отборы; Н – надбандажные протечки; Д – диафрагменные протечки; З – перетекание в радиальном зазоре

Таблица 1
Интегральные характеристики ЦНД паровой турбины мощностью 360 МВт

№ ступени	Параметр на выходе из ступени	Эксперимент	Расчет 1	Расчет 2	Расчет 3
1	P, кПа	–	321,2	316,1	314,4
	T, К	–	504,8	500,7	494,4
2	P, кПа	–	190,3	186,7	182,8
	T, К	–	471,2	464,2	443,0
3	P, кПа	79,9	80,02	78,61	79,84
	T, К	371,2	421,0	411,2	367,4
	I, кДж/кг	2647	2690	2643	2646
	G, кг/с	107,9	108,3	108,7	107,6
4	P, кПа	34,9	35,86	35,3	35,32
	T, К	346,4	380,0	369,2	346,1
	I, кДж/кг	2531	2568	2526	2520
	G, кг/с	100,9	101,9	102,2	101,2
5	P, кПа	8,3	8,24	8,22	8,23
	T, К	314,8	320,5	320,6	313,7
	I, кДж/кг	2350	2390	2387	2370
	G, кг/с	96,0	100,1	91,7	95,1

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что при использовании более простых уравнений состояния (расчеты 1 и 2) наблюдаются ее значительные расхождения расчетных и экспериментальных данных, чем при использовании уравнения IAPWS-95 (расчет 3). Тем не менее, точность расчетов 1 и 2 является приемлемой для оценки характеристик проточной части на предварительных этапах модернизации и проектирования. Поверочные расчеты в цилиндрах низкого давления необходимо проводить с использованием уравнения состояния IAPWS-95, которое более точно описывает реальные свойства рабочего тела, особенно при наличии фазовых переходов.

Проточная часть ЦНД паровой турбины К-200-130

Проведено численное исследование трехмерно вязкого течения в одной из модификаций проточной части ЦНД паровой турбины К-200-130 (рис. 2, модификация ХЦКБ «Энергопрогресс») [16] с использованием уравнения состояния Таммана (расчет 4), уравнения состояния Ван-дер-Ваальса (расчет 5) и уравнения IAPWS-95 (расчет 6). Исследуемый цилиндр низкого давления эксплуатируется в широком диапазоне изменения давления в конденсаторе от 3,5 кПа (номинальный режим работы) до 12,3 кПа, поэтому расчеты выполнялись при следующих условиях: полное давление на входе – 117 кПа, полная температура на входе – 493 К, расход пара в отборе – 2,276 кг/с, статическое давление на выходе – 12,3 кПа (режим 1), 8 кПа (режим 2), 5 кПа (режим 3), 3,5 кПа (режим 4). Первая и вторая ступени ЦНД работают в области перегретого пара,

а третья – во влажном паре. Расчеты проводились на сетках Н-типа с суммарным числом ячеек около 5 млн.

В табл. 2 и на рис. 3 приведено сравнение некоторых результатов газодинамических расчетов, а также результатов расчетов ХЦКБ «Энергопрогресс».

Из представленных результатов видно, что результаты расчетов, выполненных с использованием уравнения IAPWS-95 (расчет 6), существенно отличаются от расчетов, в которых используются уравнения Таммана (расчет 4) и Ван-дер-Ваальса (расчет 5) по таким величинам, как температура, энтальпия, расход и мощность.

Самое значительное расхождение интегральных характеристик наблюдается на режиме с наиболее низким давлением в конденсаторе (режим 4). При этом расчеты с уравнением IAPWS-95 и расчеты ХЦКБ «Энергопрогресс» согласуются достаточно хорошо.

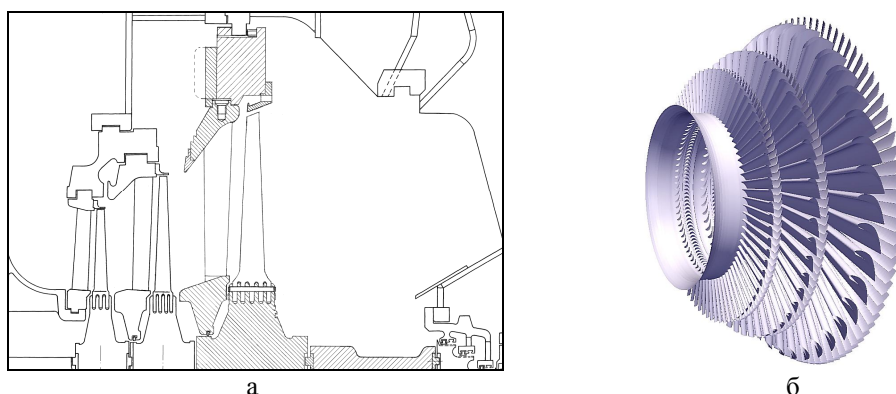


Рис. 2. Проточная часть ЦНД паровой турбины К-200-130:
а – меридиональное сечение; б – трехмерное изображение

Таблица 2

Интегральные характеристики ЦНД паровой турбины К-200-130

Название расчета	Режим	$P_{\text{вых}}$, кПа	$T_{\text{вых}}$, К	$I_{\text{вых}}$, кДж/кг	$G_{\text{вых}}$, кг/с	$N_{1\text{ст}}$, МВт	$N_{2\text{ст}}$, МВт	$N_{3\text{ст}}$, МВт	$N_{\text{ЦНД}}$, МВт
Расчет ХЦКБ	1	12,3	323	2552	54,36	6,56	6,75	5,38	18,69
	2	8	308	2505	54,36	6,56	6,72	8,35	21,63
	3	5	299	2474	54,36	6,56	6,72	10,35	23,63
	4	3,5	300	2471	54,36	6,56	6,72	10,63	23,91
Расчет 4	1	12,4	325,3	2572	54,29	6,69	7,43	5,77	19,79
	2	8	314,9	2590	53,61	6,51	7,54	9,1	23,15
	3	5	308,5	2622	53,46	6,43	7,54	11,29	25,26
	4	3	292,9	2631	53,89	6,32	7,49	11,84	25,65
Расчет 5	1	12,4	337,6	2557	55,55	6,45	7,12	6,14	19,71
	2	8	328,3	2496	55,83	6,43	7,12	9,18	22,73
	3	5	323	2447	56,01	6,41	7,05	10,92	24,38
	4	3,3	307,2	2374	56,1	6,4	7,01	11,09	24,5
Расчет 6	1	12,4	322,9	2555	54,61	6,31	7,14	5,86	19,3
	2	8	314	2510	54,62	6,33	7,28	8,57	22,18
	3	5	306,4	2478	54,58	6,33	7,31	10,35	23,99
	4	3,3	299,5	2465	54,7	6,33	7,3	10,54	24,17

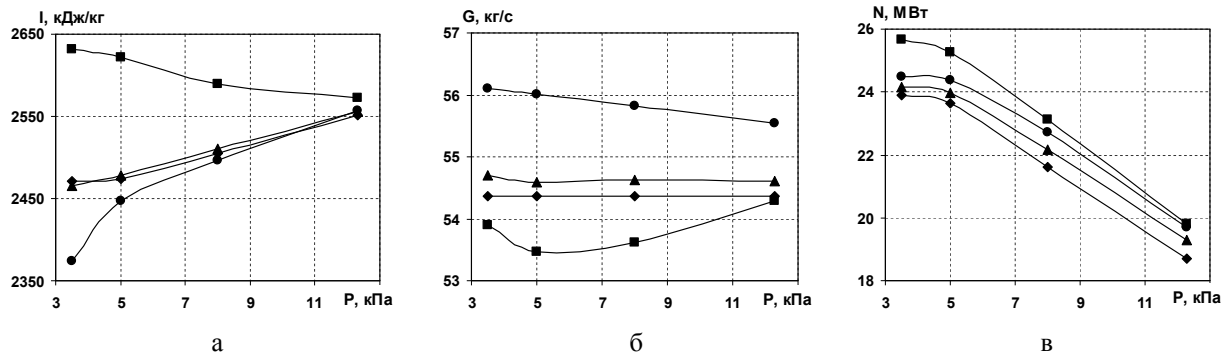


Рис. 3. Результаты газодинамических расчетов проточной части ЦНД паровой турбины К-200-130:
 а – энтальпия на выходе из ЦНД; б – расход на выходе из ЦНД; в – мощность ЦНД;
 –◆– ХЦКБ «Энергопрогресс»; –■– ур. Таммана; –●– ур. Ван-дер-Ваальса; –▲– ур. IAPWS-95

Как известно, при использовании сложных уравнений состояния увеличивается время проведения расчетного исследования [18], поэтому предварительные расчеты, в том числе и расчеты отдельных венцов/ступеней, целесообразно проводить с применением более простых уравнений. Основываясь на этом утверждении, выполнен отдельный расчет в 1-2 ступени и 3 ступени (расчет 7, табл. 3) с использованием уравнения Таммана. Учитывая, что первая и вторая ступени работают в области перегретого пара, а третья – во влажном паре, а также то, что последняя (третья) ступень практически во всем диапазоне режимов эксплуатации турбины находится в режиме «запирания» (параметры потока перед ней слабо зависят от величины статического давления на выходе из проточной части), в случае постоянных граничных условий на входе в ЦНД корректно проводить только один расчет 1-2 ступеней. В то же время для третьей ступени необходимо численное моделирование течения на всех режимах.

различия в полученных данных существенны. Это свидетельствует о том, что для проведения предварительных расчетов приемлемо использование простых уравнений состояния, однако поверочные расчеты в объектах с наличием фазовых переходов рабочего тела необходимо проводить с использованием уравнений состояния IAPWS-95.

Турбина когенерационной ОРС установки

Исследована турбина для когенерационной установки малой мощности, работающей по ОРС циклу и использующей в качестве рабочего тела силикатное масло (MDM). На рис. 4 представлен вид меридионального сечения проточной части, состоящей из 7 ступеней. Расчеты выполнялись для 4–7 ступеней при следующих граничных условиях: полное давление на входе – 2,76 бар, полная температура на входе – 530,4 К, статическое давление на выходе – 0,17 бар, частота вращения – 9000 об/мин. Численный эксперимент проводился с использованием двух различных уравнений состояния: Таммана и модифицированного Беннедикта-Вебба-Рубина с 32 членами. В расчетах применялись структурированная сетка Н-типа с суммарным числом ячеек около 4 млн.

В табл. 4 представлены сравнения интегральных характеристик исследуемых ступеней. Из приведенных результатов видно небольшое различие в полученных характеристиках. Это связано с тем, что исследуемая проточная часть работает в зоне перегретого пара.

Таблица 3
 Расчет 7. Интегральные характеристики ЦНД паровой турбины К-200-130, полученные с использованием уравнения состояния Таммана

№ ступени	Режим	$P_{вх}$, кПа	$P_{вых}$, кПа	$T_{вых}$, К	$G_{вых}$, кг/с	$N_{ст}$, МВт
1	1-4	117	60,8	-	54,36	6,57
2	1-4	60,8	27,8	-	54,36	7,26
3	1	27,8	12,46	329,1	54,39	5,61
	2	27,8	8,01	312,6	54,45	8,82
	3	27,8	5,0	297,6	54,40	10,63
	4	27,8	2,83	295,1	53,49	10,81

Сравнение результатов сквозного расчета проточной части ЦНД (расчет 4, табл. 2) и отдельного расчета (расчет 7, табл. 3) с использованием уравнения Таммана показало, что интегральные характеристики в первых двух ступенях имеют незначительные расхождения, в то время как в третьей ступени

Заключение

Исходя из результатов проведенных численных исследований в различных проточных частях турбомашин следует отметить, что для выполнения предварительных расчетов приемлемо использова-

ние простых уравнений состояния (совершенного газа, Таммана) как для отдельно исследуемых ступеней, так и для проточных частей в целом. Поворотные расчеты в объектах с наличием фазовых переходов рабочего тела необходимо проводить с использованием уравнений состояния IAPWS-95 и

модифицированного Беннедикта-Вебба-Рубина с 32 членами, которые более точно описывают реальные свойства. Такой подход дает возможность сократить время работ, связанных с проектированием новых и модернизацией существующих проточных частей.

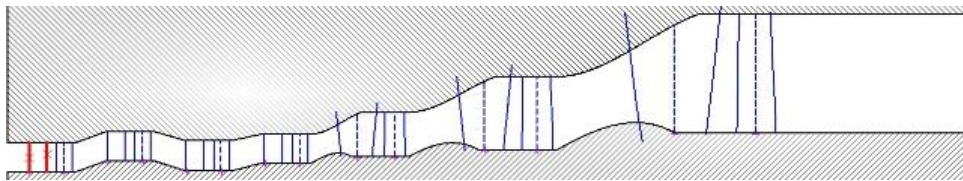


Рис. 4. Меридиональное сечение проточной части турбины когенерационной ORC установки

Таблица 4

Интегральные характеристики проточной части турбины когенерационной ORC установки

№ ступени	Уравнение состояния	Статическое давление на выходе $P_{\text{вых}}$, bar	Температура на выходе $T_{\text{вых}}$, К	Энтальпия на выходе I , Дж/кг	КПД η , %	Мощность N , кВт
4	Tammann	1,53	525,3	8431	83,94	12,8
	mBWR32	1,54	524,6	8597	87,12	13,2
5	Tammann	0,8	519,7	9609	87,33	15,75
	mBWR32	0,79	518,7	9943	86,92	16,1
6	Tammann	0,4	513,7	10126	87,97	17,35
	mBWR32	0,39	512,8	10650	87,36	18,1
7	Tammann	0,17	505,9	13208	90,94	21,8
	mBWR32	0,17	505,7	13310	90,75	21,55

Литература

1. Зоммерфельд, А. Термодинамика и статическая физика [Текст] / А. Зоммерфельд. – М. : Иностранная литература, 1995. – 479 с.

2. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. – М. : Наука, 1976. – 400 с.

3. Нацкокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нацкокин. – М. : Высш. шк., 1980. – 496 с.

4. Younglove, B. A. Thermophysical Properties of Fluids II Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane [Text] / B. A. Younglove, J. F. Ely // Journal of Physical and Chemical Reference. – 1987. – 577 p.

5. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use [Electronic resources]. – Available from: <http://www.iapws.org>. – 5.05.2015.

6. А. с. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовісцевих турбомашинах «FlowER» [Текст] / С. В. Єршов, А. В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, ПА № 77; 19.02.96. – 1 с.

7. Русанов, А. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст]

/ А. В. Русанов, С. В. Єршов. – Х. : ИПМаш НАН Украины, 2008. – 275 с.

8. Русанов, А. В. Использование уравнений термодинамических свойств водяного пара IAPWS-95 в 3-D расчетах [Текст] / А. В. Русанов, Н. В. Пащенко // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. – 2010. – № 5/7(47). – С. 37–41.

9. Русанов, А. В. Интерполяционно-аналитическая аппроксимация модифицированного уравнения состояния Беннедикта-Вебба-Рубина для учета реальных свойств рабочих тел в трехмерных расчетах [Текст] / А. В. Русанов, П. Лампарт, Р. А. Русанов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 18–23.

10. Lampart, P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases [Text] / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery, Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002. – No. 122. – P. 63–70.

11. Хомылев, С. А. Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей: часть 1 – верификация расчетного метода [Текст] / С. А. Хомылев, С. Б. Резник, С. В. Єршов // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 23–31.

12. Marcinkowski, S. Results of extended flow

measurements in the LP part of 18K370 steam turbine [Text] / S. Marcinkowski, A. Gardzilewicz, J. Gluch // Rep. Diagnostyka Maszyn. – 1999. – № 11/99. – 59 p. (in Polish).

13. Lampart, P. Validation of 3D RANS Solver With a State Equation of Thermally Perfect and Calorically Imperfect Gas on a Multi-Stage Low-Pressure Steam Turbine Flow [Text] / P. Lampart, A. Rusanov, S. Yershov // Journal of Fluids Engineering. – 2005. – Vol. 127. – P. 83–93.

14. Gardzilewicz, A. Wykorzystanie techniki numerycznej CFD dla modernizacji układów przepływowych turbin parowych [Text] / A. Gardzilewicz // Podstawowe problemy maszyn i urządzeń energetycznych, Wyd. Komitet Problemu Energetyki PAN, Jabłonna. – 2003. – S. 17–29.

15. Русанов, А.В. Моделирование 3D течений в проточной части ЦНД паровой турбины с использованием системы уравнений термодинамических свойств воды и водяного пара IAPWS-95 [Текст] /

А. В. Русанов, П. Лампарт, Н. В. Пащенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7(94). – С. 107–113.

16. Мамонтов, Н. И. Некоторые проблемы реконструкции и модернизации паровых турбин тепловых электростанций Украины [Текст] / Н. И. Мамонтов, Т. Н. Пугачева // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 152–161.

17. Разработка проточной части ЦСД паровой турбины Т-125/150-12,8 на основе использования современных компьютерных технологий [Текст] / А. В. Русанов, А. Л. Шубенко, А. Ю. Култышев и др. // Вісник НТУ «ХПИ»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2014. – № 11. – С. 16–29.

18. Dykas, S. Numerical calculation of the steam condensing flow, Task Quarterly [Text] / S. Dykas // Scientific Bulletin of Academic Computer Center in Gdansk. – 2001. – Vol. 5, No. 4. – P. 519–535.

Поступила в редакцию 25.05.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, член-корреспондент НАН Украины А. Л. Шубенко, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ В'ЯЗКИХ ТЕЧІЙ У ПРОТОЧНИХ ЧАСТИНАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТУРБІН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ РІВНЯНЬ СТАНУ

А. В. Русанов, Н. В. Пащенко, Р. А. Русанов

У статті представлено результати чисельних досліджень у декількох проточних частинах турбін з використанням різних рівнянь стану робочого тіла: досконалого газу, Таммана, Ван-дер-Ваальса, Беннедикта-Вебба-Рубіна, IAPWS-95. 3D розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу IPMFlow, який є розвитком програм FlowER та FlowER-U. Показано, що для проведення попередніх розрахунків, які не вимагають великої обчислювальної точності, доцільно застосовувати прості рівняння стану з подальшим виконанням перевірочних розрахунків із застосуванням рівнянь стану, що більш точно узгоджуються з реальними властивостями робочих тіл.

Ключові слова: рівняння стану, проточна частина, розрахункові дослідження, просторові в'язкі течії.

MODELING OF VISCOUS FLOWS IN FLOW PARTS OF POWER TURBINES USING THE DIFFERENT EQUATIONS OF STATE

A. V. Rusanov, N. V. Paschenko, R. A. Rusanov

The article presents the results of numerical investigations in several flow parts of the turbines using different equations of state of the working medium: perfect gas, Tamman, Van-der-Waals, Benedict-Webb-Rubin, IAPWS-95. 3D calculations are performed using the software complex IPMFlow, which is the development of software complexes FlowER and FlowER-U. It is shown, that for preliminary calculations that do not require large computational accuracy, it is advisable to apply a simple equation of state with the subsequent performance of testing calculations using the equations of state which most closely consistent with the actual properties of working fluids.

Key words: equation of state, flow part, computational researches, spatial viscous flows.

Русанов Андрей Викторович – д-р техн. наук, проф., член-корреспондент НАН Украины, зам. директора по научной работе, зав. отделом гидроаэромеханики энергетических машин, ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Пащенко Наталья Викторовна – канд. техн. наук, науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: pashchenko@ipmach.kharkov.ua.

Русанов Роман Андреевич – аспирант, Институт проточных машин им. Р. Шевальского Польской академии наук, Гданьск, Польша, e-mail: roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua.