

УДК 621.165:532,6

Я. СУРВИЛО, П. ЛАМПАРТ, М. ШИМАНЯК*Институт проточных машин им. Р. Шевальского ПАН, Гданьск, Польша*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРЦИАЛЬНОГО ПОДВОДА РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТУРБИНЕ ORC

Исследование осевой многоступенчатой турбины ORC мощностью 100 кВт с парциальным подводом рабочего тела проводилось с помощью модели RANS в программном комплексе ANSYS CFD. Описана методология исследований CFD, включая разработку модели потока и построения сеток. Описываются основные особенности парциального подвода рабочего тела в турбине, такие как нестационарности режимов течения вдоль окружности. Исследуются нестационарные силы, действующие на лопатки рабочего колеса. Также на всей окружности описывается влияние парциального подвода рабочего тела на условия работы следующей ступени.

Ключевые слова: когенерация, ORC, турбина с парциальным подводом, CFD.

Введение

Перспективным решением для когенерации является использование органического цикла Ренкина (ORC) [1,2]. Эта технология особенно удобна для установок малой мощности, где условия когенерации гораздо легче выполнять. ORC позволяет утилизировать тепло средней и низкой температуры. Таким образом, это особенно подходит для малых установок, работающих на биомассе, и установок рекуперации тепла.

ORC циклы могут применяться в различных типах турбин – от одноступенчатых радиальных или радиально-осевых до многоступенчатых осевых. В этой статье описывается многоступенчатая осевая турбина, подготовленная для работы в Институте проточных машин. Общее число ступеней равно семи, и номинальная мощность чуть ниже 100 кВт. Скорость вращения турбины 9000 об/мин. В качестве рабочего тела было выбрано силикатное масло MDM (octamethyltrisiloxane). Это рабочее тело характеризуется благоприятными термодинамическими свойствами в среднетемпературном диапазоне параметров. Максимальными значениями температуры и давления для этого цикла являются 553,5 К и 1200 кПа. Одним из недостатков этой рабочей среды является большая изменчивость ее удельного объема в зависимости от температуры и давления. Удельный объем на входе в турбину 0,0081 м³/кг. Относительно низкий расход для номинальной мощности турбины дает малую высоту лопатки (около 2-4 мм). Это является неприемлемым из-за высоких вторичных потерь и потерь протечки. Также маленькие лопатки трудны в производстве.

Решением этой проблемы является использование парциального подвода в первых трех

ступенях, что позволяет увеличить высоты лопаток. В рассматриваемой конструкции, дуга парциальности растет постепенно, начиная с 25 % до 50 и до 75 % всей окружности. Парциальный подвод также имеет тенденцию к снижению эффективности ступени, но в меньшей степени, по сравнению со случаем очень низкой высоты лопасти. Другая проблема – это дополнительные нестационарные силы и моменты, действующие на лопатки ротора и целое рабочее колесо [3, 4].

С учетом вышесказанного, численный анализ был проведен для проверки конструкции турбины и ее ввода на испытательный стенд. Основными ожидаемыми результатами от расчетов являются нестационарные силы, связанные с входом и выходом лопатки ротора из дуги подвода. Численное моделирование также дает информацию о распределении давления, температуры и числа Маха на последующих ступенях турбины, сопоставляемых на всей окружности.

Модель CFD

Расчеты CFD проводились с помощью программного комплекса ANSYS Fluent v15 [5]. Геометрия CAD была создана в программе Autodesk Inventor. Он содержит область потока для восьми лопаточных венцов (четыре ступени турбины). Геометрия экспортируется в программный пакет ICEM-CFD и дискретизируется. В качестве генератора сетки использовался ICEM-CFD, что также относится к комплексу ANSYS. Это позволяет легко генерировать полностью структурную шестигранную сетку. Этот тип сетки по-прежнему настоятельно рекомендуется для CFD расчетов. Сетка была сгенерирована для первых четырех ступеней турбины ORC. В последнюю ступень рабочее

тело поступает по полной окружности, в то время как первые три имеют парциальный подвод. Так как наиболее важными ожидаемыми результатами расчетов являются нестационарные силы, действующие на лопатки ротора, моделирование должно быть выполнено в нестационарном (квази-нестационарном) режиме. Применяется RANS подход с k -SST моделью турбулентности. Области ротора установлены как подвижные с интерфейсными граничными условиями между статором и ротором. Граничные условия для давления задаются на входе и выходе. Используется решатель с разностной схемой второго порядка.

Шаг по времени для квазинестационарных расчетов был установлен на уровне 6×10^{-6} с. Вычисление одного оборота ротора (1660 шагов по времени) занимает около 120 часов. Для выполнения расчетов использовался персональный компьютер Intel i7 3770k с частотой процессора 3,9 ГГц и 32 Гб оперативной памяти.

На ранних этапах вычислений, использовалось уравнение идеального газа для аппроксимации свойств рабочего тела. Индивидуальная газовая постоянная, вязкость и теплоемкости (постоянные значения) были оценены как средние значения от входных/выходных параметров. После трех оборотов модель рабочего тела была изменена на модель реального газа NIST. Использование модели идеального газа обеспечивает ускорение и сходимость расчетов. С другой стороны, модель реального газа приводит к точности определения параметров потока.

Численные результаты

Парциальный подвод вызывает изменение параметров потока по всей окружности [4-6]. Отличительной особенностью является область быстрой экспансии и очень низкого давления за последним направляющим аппаратом (рис. 1). Это явление напоминает эффект вакуума, которое происходит при высокой инерции рабочего тела, текущего далее через межлопаточный канал, и остановки подвода потока. В эту область низкого давления прибывает жидкость из соседних межлопаточных каналов. Таким образом, появляются области обратного течения и завихрений [7].

Еще одной проблемой, связанной с многоступенчатым парциальным подводом, является необходимость правильной установки направляющих аппаратов в последующих ступенях. Необходимо, чтобы основной поток жидкости, который выходит из одной ступени, направлялся в дугу следующего подвода, чтобы предотвратить дополнительные потери из-за возможного натекания потока жидкости

на заблокированную область. В первом приближении, положение последующих направляющих аппаратов была рассчитана на основе треугольников скоростей и пространства между ступенями. Окончательно эти позиции были подтверждены CFD моделированием. Картина линий тока, изображенных на рисунке 2, показывает, что поток, проходящий через такой вариант многоступенчатого парциального подвода, является гладким.

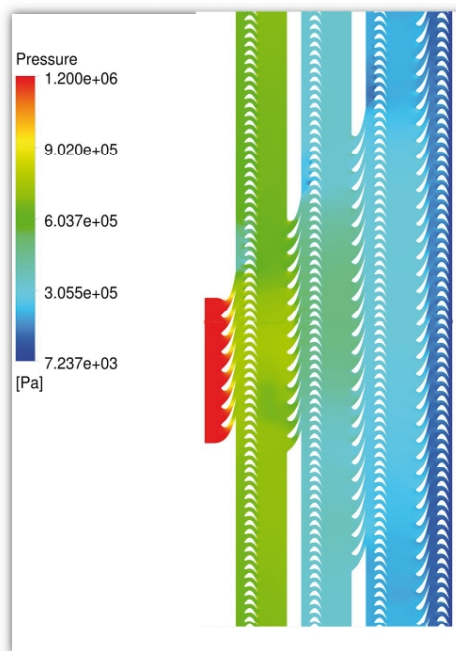


Рис. 1. Контуры статического давления четырех ступеней турбины ORC в среднем сечении

Одной из наиболее важных особенностей парциального подвода потока, является сильно нестационарный характер сил, действующих на лопатки ротора. Хотя взаимодействие между статором и ротором, характерное для ступеней без парциальности, наблюдается четко, самые зрелищные изменения сил наблюдаются на входе и выходе из дуги парциальности. Изменения крутящего момента, действующего на лопатки рабочих колес 1-4 ступеней (ступени 1-3 с парциальным подводом, 4 ступень – без), представлены на рисунке 3. Крутящий момент стремится к нулю за дугой парциального подвода. В дуге подвода крутящий момент постепенно возрастает и колеблется за счет взаимодействия между статором и ротором. Особенно резкие изменения крутящего момента наблюдаются в конце дуги подвода. Видно что крутящий момент, прежде чем стремиться к нулю, явно увеличивается внутри дуги, что вызвано положением еще продолжающегося подвода на стороне высокого давления и прекращения

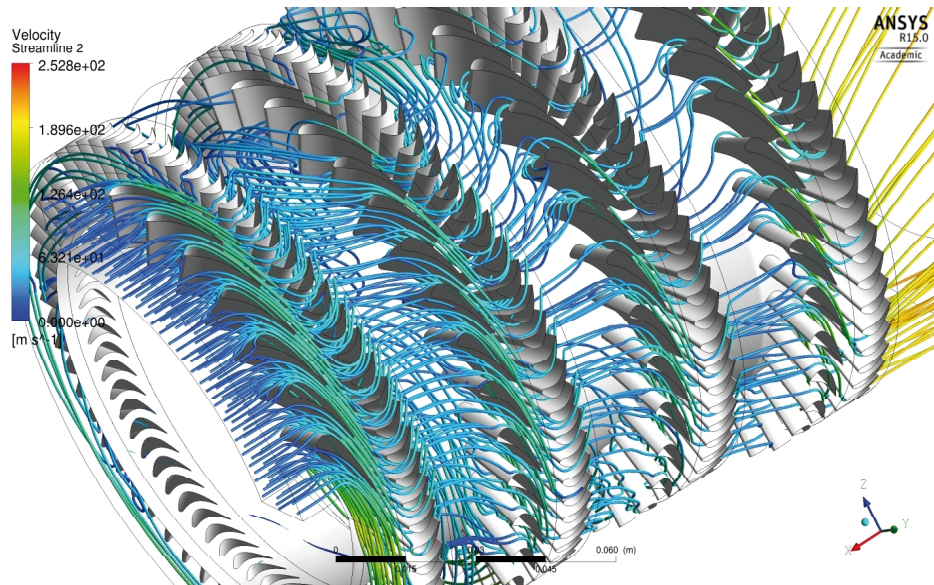


Рис. 2. Линии тока, окрашенные по скорости

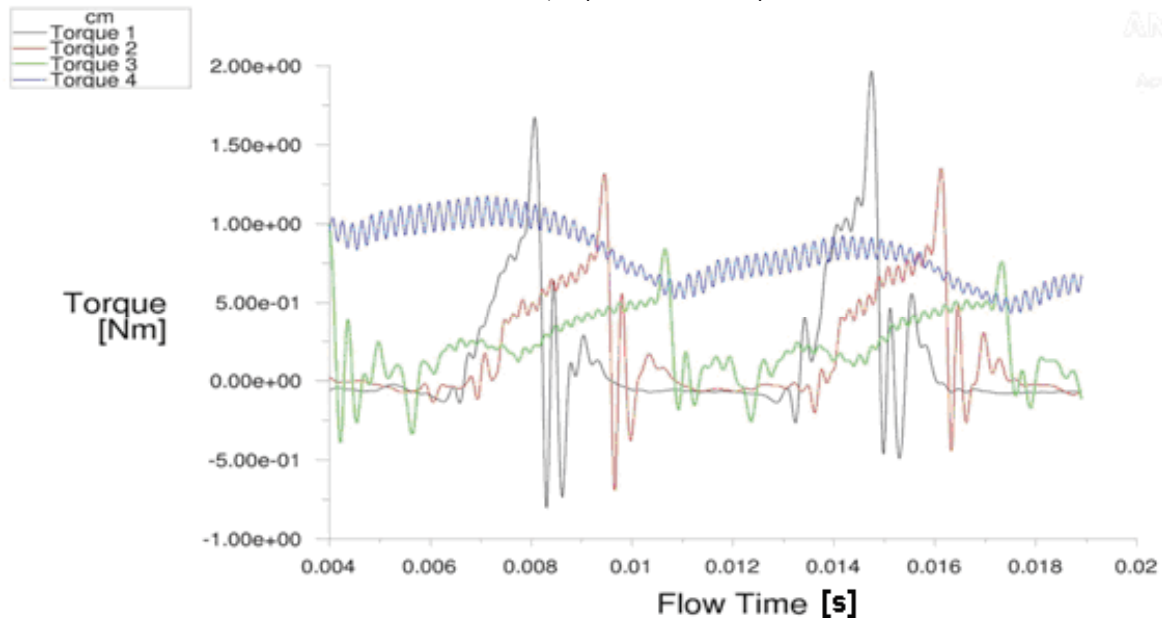


Рис. 3. График крутящего момента, действующего на лопатку ротора первых четырех ступеней турбины – ступень 1 (черный), ступень 2 (красный), ступень 3 (зеленый), ступень 4 (синий – без парциальности)

подвода на стороне закрытия подвода, когда лопатка ротора покидает дугу подвода. Наблюдаемый нестационарный характер крутящего момента может привести к сильному износу лопаток ротора.

Синяя линия на рисунке 3 представляет собой действующий крутящий момент на четвертой ступени. Хотя четвертая ступень уже полностью открыта, по-прежнему наблюдаются значительные изменения крутящего момента в связи с несимметрией параметров потока по окружности на входе в четвертую ступень. В дальнейшем исследовании всех семи ступеней

турбины, будет определяться, как эта окружная неравномерность распространяется на последующих 5-7 ступенях.

Эффективность потока последующих ступеней турбины может быть вычислена как отношение осредненной по времени мощности ступени, полученной из CFD вычислений к теоретической мощности для изоэнтропической подводки расширения. Расчетные значения эффективности для 1-3 ступени с парциальным подводом равны 65,9%, 73,4% и 70,6%, соответственно. Эффективность 4 ступени без парциального подвода равна 79,5%. Полученные значения

будут проверяться с помощью экспериментальных исследований.

Выводы

С помощью CFD были исследованы первые четыре ступени осевой многоступенчатой турбины ORC с парциальным подводом рабочего тела. Конечная объемная 3D модель содержит более 8500000 элементов. Основное внимание было уделено влиянию парциального подвода на характеристики турбинной ступени. Парциальность является причиной окружной несимметрии структуры течения и нестационарных сил, действующих на рабочие лопатки 1-3 ступеней. Было установлено, что пиковые значения сил, действующих на лопатки, в момент ухода от дуги подвода значительно превышают значения в середине дуги, которые могут привести к износу лопаток ротора. Наблюдаемая нестационарность также имеет тенденцию распространяться на 4 ступень, выполненную без парциального подвода. Дополнительные исследования необходимы, чтобы определить, как далеко несимметричность из-за парциальности распространяется далее по течению и как смягчить последствия парциального подвода.

Литература

1. Duvia A. ORC plants for power production from biomass from 0.4 to 1.5 MWe [Text] / A. Duvia, M. Gaia // Proc. 7th Holzenergie Symposium, Technology, efficiency, practical

experiences and economy, 18 October 2002, ETH Z'rich, 2002 – pp 165-180.

2. Mikielewicz J. Application of renewable energy sources to drive ORC mikro CHP [Text] / J. Mikielewicz, S. Byku, D. Mikielewicz // Heat transfer and Renewable Sources of Energy, 2006. – pp. 329-336.

3. Wakaley G. Unsteady flow phenomena in partially-admitted steam turbine control stages [Text] / G. Wakeley, I. Potts: Proc. Inst. Mech. Engrs., Conference on Turbomachinery, 9-10 December 1996, Rugby, UK, 1996 pp. 77-86.

4. Partial admission in an axial turbine stage [Text] / J. Skopek, J. Vomela, L. Tajc, J. Polansky: Proc. 3rd European Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics, 2-5 March 1999, London, UK, 1999 pp. 681-691.

5. ANSYS Customer Portal Support, Aviable from: <http://support.ansys.com/>

6. Lampart P. Unsteady forces acting on rotor blades of a large power steam turbine control stage at different levels of partial admission [Text] / P. Lampart, M. Szymaniak, A. Karda // Trans. Institute of Fluid- Flow Machinery. – 2003. – Vol. 114. – pp.5-17.

7. Lampart P. Numerical investigation of unsteady flow in a partial admission control stage of a 200 MW steam turbine [Text] / P. Lampart, M. Szymaniak, R. Kwiziski: , Proc. 6th Europ. Conf. on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermo-dynamics, 7-11 March 2005, Lille, France, 2005 – pp. 376-389.

Поступила в редакцию 15.06.2015

Я. Сурвіло, П. Лампарт, М. Шиманяк. Дослідження парціального підводу робочого тіла в турбіні ORC

Дослідження осьової багатоступінчатої турбіни ORC потужністю 100 кВт з парціальним підводом робочого тіла проводилося за допомогою моделі RANS в програмному комплексі ANSYS CFD. Описана методика дослідження CFD, включаючи розробку моделі потоку та побудови сіток. Описуються основні особливості парціального підводу робочого тіла в турбіні, такі як нестационарності режимів течії уздовж окружності. Досліджуються нестационарні сили, діючі на лопатки робочого колеса. Також на всьому колі описується вплив парціального підводу робочого тіла на умови роботи наступної ступені.

Ключові слова: когенерація, ORC, турбіна з парціальним підводом, CFD.

J. Surwilo, P. Lampart, M. Szymaniak. Investigation of partial admission flow in an ORC turbine

An axial multi-stage partial-admission 100 kW ORC turbine is investigated with the help of RANS model in the ANSYS CFD package. The applied methodology of CFD investigations is shortly described, including the formulation of the flow model and grid construction. Main features of partial admission flow in the turbine, such as a non-uniformity of flow patterns along the circumference are discussed. Unsteady forces acting at the rotor blades are investigated. The influence of partial admission on the working conditions in the next stage supplied at the whole circumference is also described.

Keywords: cogeneration, ORC, partial admission turbine, CFD.