

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ В КОНТРОЛЬНЫХ  
СЕЧЕНИЯХ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПГУ ПРИ РАБОТЕ ЕЕ В  
МОТОРНОМ РЕЖИМЕ <sup>\*74</sup>**

**Аракелян Э.К., Пикина Г.А., Мезин С.В. , Андрюшин А.В.**  
*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва ул. Красноказарменная д.17  
edik\_arakelyan@inbox.ru*

*Аннотация: При моделировании учитываются особенности моторного режима – влияние параметров и расходов охлаждающего пара и пара, проникающего из концевых уплотнений, в проточную часть; распределение давления пара между отсеками и ступенями; теплообмен между паром ступени и наружным воздухом. Приведены расчетные выражения и алгоритм расчета температуры пара в контрольных сечениях турбины, дана оценка влияния предлагаемых уточнений на температурное состояние.*

Ключевые слова: моделирование, паровая турбина, разбиение, отсеки и группы ступеней, моторный режим, особенности, алгоритм, температура, контрольное сечение.

---

<sup>74</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект №18-08-01090).

В процессе эксплуатации парогазовых установок (ПГУ) большой мощности в режимах регулирования мощности выявились некоторые проблемы, характерные для оборудования ПГУ на частичных нагрузках, в частности: ухудшение экологических характеристик; заметное снижение экономичности работы газовых турбин и ПГУ в целом; снижение надежности работы паровой турбины и ряд других, что ограничивает регулировочный диапазон энергоблока. Для решения возникшей проблемы расширения регулировочного диапазона ПГУ в технической литературе приведены ряд технических предложений, в частности, в [1] предложен режим перевода паровой турбины Т-15/150 ПГУ-450 при прохождении провалов графиков электропотребления в моторный режим (МР), техническую возможность реализации которого показано в [1-3]. На основе газодинамических и энергетических уравнений потока пара в активной ступени паровой турбины для частного случая – беспарового моторного режима (с полным прекращением подачи пара в турбину, при постоянном давлении, без учета теплообмена с внешней средой и др.) получены уравнения, позволяющие оценить температуру пара и металла в переходном и стабилизированном режимах в ступени. Анализ результатов проведенных исследований на базе позволили выделить некоторые особенности процессов, характерные для паровых турбин при их работе в указанных режимах:

1. При переводе паровой турбины в моторный режим можно выделить три временных этапа работы паровой турбины: перевод турбины от исходного состояния в моторный режим; переходной режим от исходного состояния (после первого пункта) до стабилизации всех параметров; длительность переходных процессов зависит от мощности турбины, параметров и количества охлаждающего пара; стационарный режим работы всех элементов турбины и вспомогательных агрегатов;

2. Работа паровой турбины в беспаровом режиме приводит к быстрому разогреву части ступеней с относительно длинными рабочими лопатками, а небольшие присосы пара через уплотнения турбины не обеспечивают охлаждение от вентиляционного разогрева металла лопаток, выявлена необходимость подачи охлаждающего пара в проточную часть турбины;

3. Вся проточная часть одноцилиндровых и паровых турбин без промежуточного перегрева пара и ЦСД и ЦНД паровых турбин с промежуточным перегревом оказываются под давлением пара в конденсаторе;

4. При работе паровой турбины в моторном режиме с подачей охлаждающего пара определены условия работы ступени с выработкой мощности;

5. Выявлены основные параметры, влияющие на тепловые и гидродинамические процессы в ступенях паровых турбинах в беспаровом и моторном режимах;

6. В некоторых ступенях происходит вытеснение потока пара в периферийную часть лопатки с образованием вихревых потоков у корня лопаток, при этом при глубоком вакууме в конденсаторе обратный поток всасывается до направляющей лопатки последней ступени ЦНД турбины и сбрасывается с основным потоком пара в конденсатор без образования вихревых потоков.

7. Выявлены участки проточной части турбин, в частности, паровой турбины Т-125/150 ПГУ-450, в которых зависимость температуры пара по длине проточной части турбины линейная.

В настоящем докладе рассматриваются особенности гидродинамических процессов проточной части турбины в целом, при этом учитывая линейный характер изменения температуры пара по длине проточной части, считается возможным разбиение ее на группы ступеней или отсеков. Число отсеков выбирается с учетом мест поступления пара в проточную часть турбины (охлаждающие потоки пара и пар из уплотнений) и возможности измерения температуры и контроля температурного состояния проточной части турбины. При композиции моделирования – получения модели части турбины, состоящей из отсеков и группы ступеней, - принято решение использовать нелинейные динамические модели с сосредоточенными параметрами СП модели, что соответствует модели многоточечного приближения. При моделировании особое внимание уделяется учету допущений, которые были приняты при упрощенном моделировании гидродинамических процессов в ступени паровой турбины, в том числе:

- влияния параметров и количества потоков пара, поступающего в проточную часть турбины через концевые уплотнения и пар на охлаждение на температуру пара в месте их поступления в проточную часть турбины;
- распределения давления пара по длине проточной части, в том числе с учетом роста давления пара на месте подачи охлаждающего пара;
- потерь тепла в окружающую среду через корпусные детали, в том числе с учетом конструктивных особенностей паровой турбины Т-125/150 ПГУ-450.

Для учета влияния параметров и количества потоков пара, поступающего из вне в проточную часть турбины на температуру пара, рассчитанной по упрощенной модели, получена следующая расчетная зависимость:

$$t_{CM} = t_{ПО} \left( \frac{1 + g_B \frac{t_B c_B}{t_{no} c_{ПО}}}{1 + g_B} \right) \frac{c_{ПО}}{c_{CM}},$$

где  $h_{ПО}, h_{CM}$  - теплосодержание (энтальпия) основного пара до и после смешения потоков;  $h_B$  -

теплосодержание пара внешнего потока в точке смешения;  $g_B = \frac{G_B}{G_{ПО}}$  - относительный расход внешнего потока пара;  $G_{ПО}, G_B$  - расходы пара основного и внешнего потоков;  $c_B, c_{ПО}, c_{CM}$  - теплоемкости пара внешнего, основного потоков и после смешения.

Анализ приведенной зависимости показывает, что учет данного фактора (при примерно одинаковых значениях теплоемкостей внешнего и основного потоков пара) может снизить температуру основного потока пара перед ступенью (при  $\frac{t_B}{t_{ПО}} < 1,0$ ), а может увеличить ( $\frac{t_B}{t_{ПО}} > 1,0$ ).

Проведенные расчеты показали, что наибольшее влияние на температуры пара перед ступенью оказывают потоки пара, поступающие в проточную часть из концевых уплотнений. Для исключения такого влияния параметры пара на концевые уплотнения необходимо выбирать таким образом, чтобы выполнялось условие  $\frac{t_B}{t_{ПО}} = 1,0$ .

Для учета распределения давления пара по отсекам турбины, необходимое для расчета температуры пара и металла при известных расходах пара на базе формулы Стодола-Флюгеля предложены методика и алгоритм расчета для прямого и противотоного движения охлаждающего пара. Алгоритм расчета разработан также для оценки требуемых расходов пара через отсеки при известном распределении давлении пара по отсекам турбины. Для учета теплообмена между паром и внешней средой приведена методика усреднения коэффициента теплопередачи и параметров пара по группе ступеней или отсека. Применительно к паровой турбине Т-125/250 предложен подход к учету ее конструктивной особенности.

Для расчета температуры пара в ступени и на выходе из ступени предложена зависимость, полученная с использованием математической модели ступени паровой турбины, приведенной в [3] с учетом вышеприведенных уточнений. Расчеты, проведенные применительно к проточной части паровой турбины Т-125/150 показали, что приведенные выше уточнения при расчете температуры пара и металла в выделенных контрольных сечениях проточной части турбины позволяют более точно отразить гидродинамические особенности работы ступеней в моторном режиме на их температурное состояние. Так, например, сделан важный вывод, что при прочих равных условиях учет положительной работы ступени приводит к снижению температуры пара за ней в пределах до 15 градусов, а уточнение распределения давления пара между отсеками при изменении давления охлаждающего пара оказывает влияние только на ближайшие 1-2 ступени от места подачи пара и т.д.

## Литература

1. Аракелян Э.К., Андрияшин А.В., Мезин С.В., Косой А.А. Особенности моделирования гидродинамических процессов в паровых турбинах ПГУ большой мощности при их работе в нерасчетных режимах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): материалы Одиннадцатой междунар. конфер., 1 - 3 окт. 2018 г., Москва: в 2-х т. / Ин-т проблем упр. им. В.А.Трапезникова. т.1. Стр. 436-439
2. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Andryushin K.A. Increased reliability, manoeuvrability and durability of steam turbines through the implementation of the generator driving mode. — WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol. 205, 2016 WIT Press, p. 95-105
3. Аракелян Э.К., Старшинов В.А. Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 1993.-328с.