

УДК 621.165

DOI: 10.12737/article\_59353e29934cb3.42937924

В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин, Д.В. Грибанов

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПАРА В ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПЛОТНЕНИЙ

Рассмотрены методы расчета утечек пара в уплотнениях по валу турбин с учетом влияния возникновения влаги в турбинах. Проанализированы причины потерь от влажности пара в проточной

части влажнопаровых турбин и особенности их расчета.

**Ключевые слова:** уплотнение, влажность, эффективность турбины, влагоудаление.

V.T. Perevezentsev, M.A. Shilin, D.V. Gribanov

## ASSESSMENT OF STEAM HUMIDITY INFLUENCE IN PRACTICAL PROBLEMS OF SEAL METERING CHARACTERISTICS DEFINITION

Actually all stages of condensing turbines at nuclear power plants and also peripheral, end and diaphragm seals on a shaft function with saturated or weak-superheated steam which causes necessity in theoretical and experimental investigations of a two-phase working medium flow in elements of a flowing part and seals.

Losses caused by moisture in a turbine part may be divided into thermo-dynamic, gas-dynamic and losses of braking.

В современных энергетических турбинах используется как перегретый пар, так и насыщенный и влажный, что вызывает необходимость теоретических и экспериментальных исследований течения двухфазного рабочего тела в элементах проточной части и уплотнениях. Для конденсационных турбин на атомных электростанциях (АЭС), работающих на насыщенном и слабоперегретом паре, это практически все ступени турбины, а также периферийные, концевые и диафрагменные уплотнения по валу.

Потери от влажности в турбинной ступени можно разделить на термодинамические, газодинамические и потери торможения [1].

Термодинамические потери связаны с теплообменом в двухфазном влажном паре, переохлажденном паре и скачкообразным выделением влаги.

Losses in seals are poorly studied because of the physical processes complexity in two-phase media. Using dependences mentioned in the paper it is possible to assess approximately moist steam leakage in a seal which will allow supplementing well-known procedures of the thermal computation of wet-steam turbines with amendments for moisture affecting considerably a coefficient of expenses of labyrinth diaphragm seals.

**Key words:** seal, humidity, turbine efficiency, moisture removal.

Газодинамические потери вызваны многими причинами:

- затраты на ускорение влажной фазы;
- уменьшение массы собственно паровой фазы;
- перераспределение параметров влажного и сухого пара;
- эрозия лопаток;
- увеличение потерь на трение;
- дополнительные завихрения и турбулентность, вторичные течения.

Ударное торможение капель вызывает прямые потери из-за изменения векторов скорости пара и влаги [1].

Если в проточной части потери от влажности теоретически (с большей или меньшей степенью приближенности) учитываются, то потери в уплотнениях наименее изучены из-за сложности физических процессов в двухфазных средах. Достаточно сказать, что термодинамические про-

цессы, происходящие в лопаточном аппарате и лабиринтовом уплотнении, различны (хотя бы потому, что в соплах происходит изоэнтروпийный процесс, а в лабиринте – изоэнтальпийный [2]). Поэтому влияние влажности на коэффициент расхода указанных элементов должно быть различным.

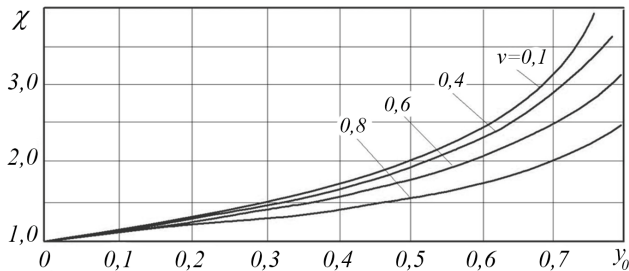


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\chi$  от скольжения фаз  $\nu$  и начальной влажности  $y_0$

Существует несколько приближенных методов оценки влияния влажности на течение в соплах. Например, при небольшой степени влажности достаточно для первого приближения оценить влияние влажности по соотношению [4]

$$\frac{\mu_c^{вл}}{\mu_c^{н.н}} = \frac{1}{\sqrt{x_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 - y_1}},$$

где  $x_1$  – диаграммная степень сухости пара за соплом;  $y_1$  – степень влажности за соплом;  $\mu$  – коэффициент расхода уплотнения.

Относительные потери за счет утечек в ступени активного типа в диафрагменном уплотнении:

$$\bar{\zeta}_{\partial.y} = \frac{\zeta_{\partial.y}^{вл}}{\zeta_{\partial.y}^{н.н}} = \frac{\zeta_y^{вл} \zeta_c^{н.н}}{\zeta_y^{н.н} \zeta_c^{вл}},$$

где  $\zeta_{\partial.y}^{вл}$  – относительные потери за счет утечек в ступени при течении влажного пара;  $\zeta_{\partial.y}^{н.н}$  – относительные потери за счет утечек в ступени при течении перегретого пара.

В работе [3] предлагается оценивать влияние влажности на утечку пара в лабиринтовом уплотнении через коэффициент  $\chi$ , характеризующий течение в двухфаз-

ном потоке с учетом начальной влажности  $y_0$  и скольжения фаз  $\nu = C_{1вл} / C_n$ :

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{(\nu^2 y_0 + (1 - y_0))(1 - y_0)}}.$$

Зависимость коэффициента  $\chi$  от скольжения фаз  $\nu$  и начальной влажности  $y_0$  представлена на рис. 1. В свою очередь, зависимость коэффициента скольжения от начального давления перед уплотнением  $p_0$ , полученная экспериментально, показана на рис. 2 [3].

Используя указанные зависимости, можно приблизительно оценить утечку влажного пара в уплотнении.

Анализ рабочих параметров пара для турбин АЭС К-500-65/3000 показал, что

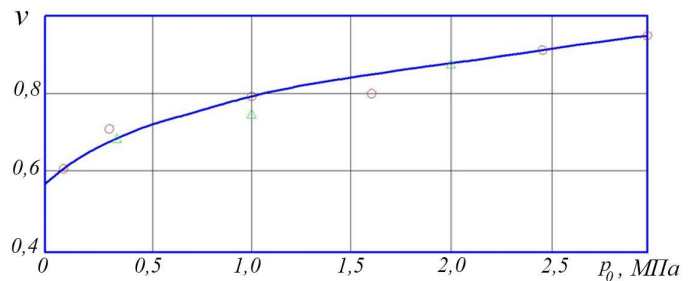


Рис. 2. Зависимость коэффициента скольжения  $\nu$  от величины  $p_0$  для ступенчатых лабиринтовых уплотнений

ступени ЦВД работают в пределах диаграммной влажности до  $y_0=16\%$  [2].

Расчёт по изложенной методике показал, что для первых двух ступеней, работающих при  $y_0 < 8\%$ , влиянием влажности на потери за счет утечек можно пренебречь.

В то же время для третьей ступени (прямоточное диафрагменное уплотнение), в которой параметры пара перед уплотнением  $p_0=2,2$  МПа,  $y_0=10\%$ , определяем коэффициент скольжения  $\nu=0,9$  (рис. 2) и коэффициент  $\chi=1,064$  (рис. 3).

Для пятой ступени (прямоточное диафрагменное уплотнение) параметры пара:  $p_0=0,69$  МПа,  $y_0=14\%$ . Соответственно  $\nu=0,78$ ,  $\chi=1,11$ .

Таким образом, потери за счет утечек рабочего тела для указанных ступеней без учета влажности могут быть занижены на 6,4 и 11% соответственно.

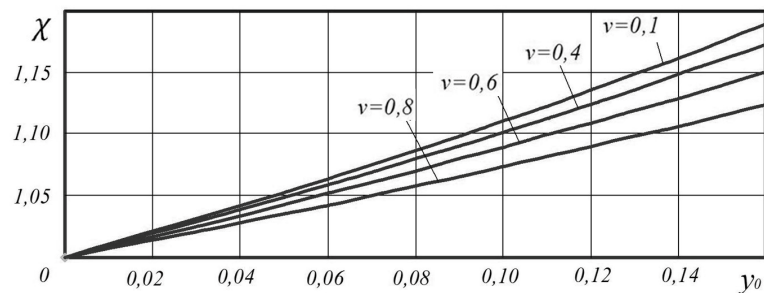


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\chi$  от скольжения фаз  $\nu$  и начальной влажности  $y_0$ , соответствующей условиям эксплуатации влажнопаровых турбин

Известные методики теплового расчета влажнопаровых турбин, которые учитывают лишь потери от влажности пара, связанные с его переохлаждением, затратами энергии на разгон капель влаги и тормозящим воздействием влажнопарового

потока на ротор турбины, должны быть дополнены поправками на влажность, значительно воздействующую на коэффициент расхода лабиринтовых диафрагменных уплотнений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, И.И. Основы теории влажнопаровых турбин / И.И. Кириллов, Р.М. Яблоник. - Л.: Машиностроение, 1968. - 264 с.
2. Жаркой, М.С. К вопросу оптимизации геометрических параметров лабиринтовых уплотнений турбомашин / М.С. Жаркой // Изв. вузов. Энергетика. - 1983. - №2. - С.79-82.
3. Дейч, М.Е. Расход влажного пара через лабиринтное уплотнение / М.Е. Дейч, В.И. Соломко, Г.С. Зезюлинский // Изв. вузов, Энергетика. - 1979. - №1. - С.77-82.
4. Костюк, А.Г. Турбины тепловых и атомных электростанций: учеб. для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. - М.: МЭИ, 2001. - 488с.
1. Kirillov, I.I. *Fundamentals of Theory of Wet-steam Turbines* / I.I. Kirillov, R.M. Yablonik. - L.: Mechanical Engineering, 1968. - pp. 264.
2. Zharkoy, M.S. To the problem of geometrical parameter optimization of labyrinth seals in turbomachines / M.S. Zharkoy // *College Proceedings. Power Engineering*. - 1983. - № 2. - pp. 79-82.
3. Deutsch, M.E. Steam consumption through labyrinth seal / M.E. Deutsch, V.I. Solomko, G.S. Zezulinsky // *College Proceedings. Power Engineering*. - 1979. - № 1. - pp. 77-82.
4. Kostyuk, A.G. *Turbines of Thermoelectric Power Stations and Nuclear Power Plants: textbook for colleges* / A.G. Kostyuk, V.V. Frolov, A.E. Bulkin, A.D. Trukhny. - M.: MEI, 2001. - pp. 488.

Статья поступила в редколлегию 27.01.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Обозов А.А.

#### Сведения об авторах:

**Перевезенцев Виктор Тимофеевич**, к.т.н., доцент каф. «Тепловые двигатели» БГТУ, тел.: 8(4832) 51-84-80.

**Шилин Максим Андреевич**, к.т.н., доцент каф. «Тепловые двигатели» БГТУ, тел.: 8(4832) 51-84-80.

**Perevesentsev Victor Timofeevich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Heat-Engines", Bryansk State Technical University, Phone: 8(4832) 51-84-80.

**Shilin Maxim Andreevich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "heat-Engines", Bryansk State Technical University, Phone: 8(4832) 51-84-80.

**Грибанов Дмитрий Владимирович**, магистрант каф. «Тепловые двигатели» БГТУ, тел.: 8(4832) 51-84-80.

**Gribanov Dmitry Vladimirovich**, undergraduate for Master's degree of the Dep. "Heat-Engines", Bryansk State Technical University, Phone: 8(4832) 51-84-80.

