

УДК 621.438

О.В. ФРАЙФЕЛЬД¹, А.А. СНИТКО¹, Н.Н. ПОНАМАРЁВ²¹ЗАО «Искра-Энергетика», Россия²ОАО «ЛМЗ», Россия

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ ПО УРАВНЕНИЯМ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Проведено сравнение результатов расчета потерь полного давления выходного устройства в программном комплексе FlowVision с результатами экспериментальных испытаний модели выходного устройства ГТУ-12П и результатов, рассчитанных по методике определения потерь полного давления в выходных устройствах газотурбинных установок.

ГТУ, выходное устройство, экспериментальные продувки, расчет геометрии, программный комплекс FlowVision, потери полного давления

Введение

В настоящее время существует очень много рекомендовавших себя программных комплексов для газодинамических расчетов. Однако определить адекватность результатов расчета по заложенной математической модели достаточно сложно, не имея на руках результатов экспериментального исследования.

1. Выходное устройство ГТУ-12П

Геометрия выходного устройства (ВУ) газотурбинной установки (ГТУ) оказывает значительное влияние на величину вырабатываемой полезной мощности силовой турбиной (СТ), что в некоторых случаях объясняется завышенными потерями полного давления в тракте ВУ, которые при проектировании турбины следует учитывать. Для определения величины потерь в ВУ ГТУ можно применить программный комплекс для газодинамических расчетов или провести ряд модельных экспериментальных продувок с последующей обработкой результатов и сведением в методику.

ВУ ГТУ-12П выполнено в виде улитки карманного типа и изображено на рис. 1. Модель ВУ изготовлена в масштабе 1:10.

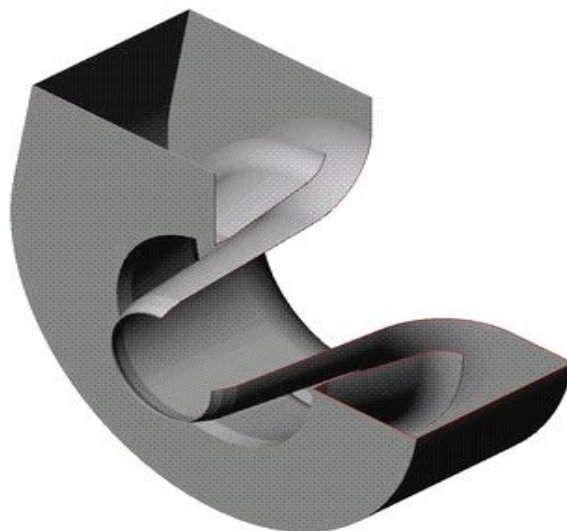


Рис. 1. Модель выходного устройства ГТУ-12П

1.1. Результаты продувки модели выходного устройства ГТУ-12П

В работе [2] экспериментально исследовалось ВУ для ГТУ-12П. Схема модели и улитки представлены на рис. 2 и 3. Результаты продувок, выполненные в этой работе, сведены в табл. 1 и отображены на рис. 4.

Методика замера давления в тракте ВУ реализована в следующих экспериментах:

1. С подробным измерением статического давления на входе, в сечении 1-1 (рис. 2), средство из-

мерения – водяной пьезометр;

2. Одна точка замера статического давления в сечении 1-1, средство измерения – измерительный комплекс;

3. Одна точка замера статического давления в сечении 1-1, средство измерения – измерительный комплекс;

4. Измерения статического давления без наклонной стенки п. 9 (рис. 3), средство измерения – водяной пьезометр;

5. Измерение статического давления без наклонной стенки п. 9, средство измерения – измерительный комплекс.

Наиболее точными данными являются результаты эксперимента № 1. Эксперименты № 2 и 4 в областях рабочих скоростей практически совпадают с № 1 и только при высоких скоростях разброс увеличивается (при $\lambda_{1G} = 0,48$ до 2%). Суммарные потери полного давления в ВУ на расчетной скорости $\lambda_{1G} = 0,35$ составляют 2,7%, потери в диффузоре 1,4%.

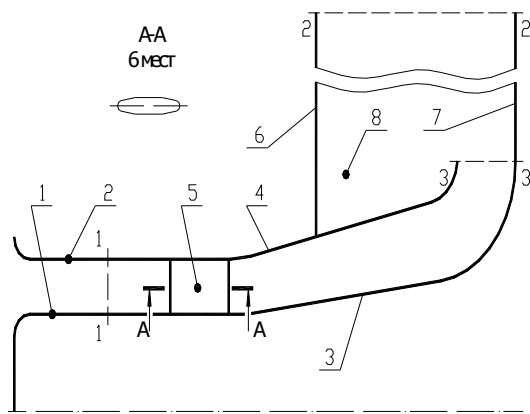


Рис. 2. Продольная схема модели ВУ:

1 – центральный обтекатель; 2 – наружная стенка; 3 – центральное тело; 4 – наружная стенка диффузора улитки; 5 – стойки; 6 – передняя стенка улитки; 7 – задняя стенка улитки; 8 – боковая стенка улитки

По данным, полученным после экспериментов, составлена и откорректирована специальная методика расчета ВУ.

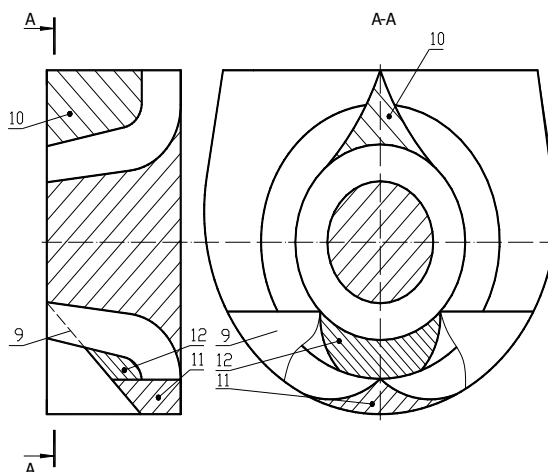


Рис. 3. Поперечный разрез модели ВУ:
9 – наклонная стенка; 10, 11, 12 – стенка канала

Таблица 1
Коэффициенты потерь полного давления

№ эксп.	λ_{1G} – приведенная скорость	σ_{Σ}^* – суммарный коэффициент потерь полного давления	$\sigma_{д}^*$ – коэффициент потерь полного давления в диффузоре
1	0,3421100	0,9739895	0,9862310
	0,3787641	0,9685400	0,9829341
	0,4409260	0,9540496	0,9764079
	0,4792111	0,9457476	0,9722350
	0,5286120	0,9283261	0,9639803
2	0,3548253	0,9720806	0,9862387
	0,3615628	0,9704300	0,9851215
	0,4043722	0,9641585	0,9821165
	0,4587303	0,9536829	0,9762026
	0,5050123	0,9420175	0,9716290
3	0,3283924	0,9746048	0,9886057
	0,3505468	0,9748038	0,9833859
	0,3979352	0,9695627	0,9805289
	0,4043508	0,9609710	0,9788778
	0,4436193	0,9521175	0,9766862
4	0,5058801	0,9402245	0,9717357
	0,3462977	0,9712569	0,9883959
	0,3550613	0,9703483	0,9886259
	0,4281946	0,9564283	0,9827349
	0,4664315	0,9479963	0,9795277
5	0,5141759	0,9346338	0,9737041
	0,3091663	0,9756185	0,9881146
	0,3568860	0,9730893	0,9870524
	0,3965210	0,9581884	0,9823403
	0,4457303	0,9543564	0,9794697
	0,5111614	0,9329475	0,9694350

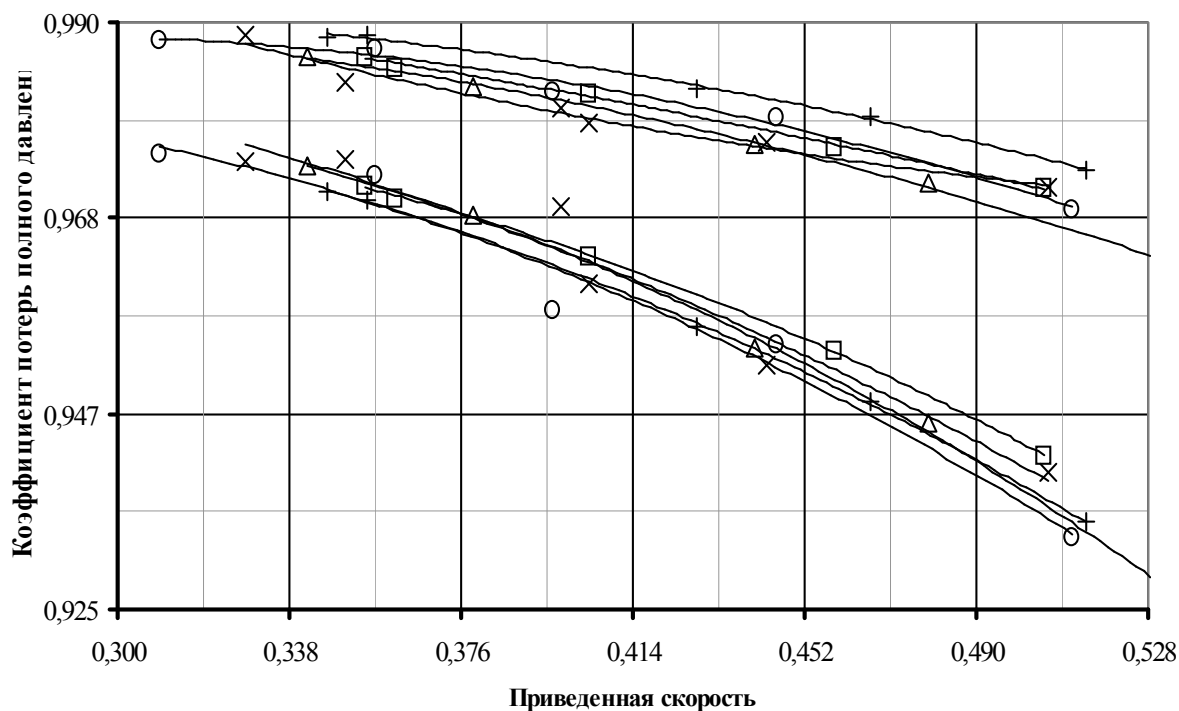


Рис. 4. Распределение коэффициентов потерь полного давления в диффузоре (верхние кривые) и суммарного (нижние): “ Δ ” — эксперимент № 1; “ \square ” — эксперимент № 2; “ \times ” — эксперимент № 3; “+” — эксперимент № 4; “o” — эксперимент № 5

Оценим влияние наклонной стенки п. 9 на потери в выхлопной системе. Потери полного давления в ВУ на расчетной скорости $\lambda_{1G} = 0,35$ равны 2,85%, в диффузоре 1,1%. Наклонная стенка позволяет уменьшить потери в ВУ на $\delta\pi = 0,15\%$.

Уменьшение потерь в диффузоре при отсутствии наклонной стенки связано с ростом неравномерности на срезе диффузора в результате отсутствия выравнивающего воздействия стенки и как следствие возрастанием потерь в улитке.

1.2. Расчет потерь полного давления в программном комплексе FlowVision

Исходными данными для моделирования течения выхлопных газов ГТУ по тракту ВУ ГТУ-12П, в программном комплексе, являются:

Газодинамические параметры выхлопного газа для номинального режима работы ГТУ, на выходе из межлопаточного канала рабочего колеса вто-

рой ступени СТ (сведены в табл. 2);

Геометрия проточной части ВУ, которая импортируется из среды SolidWorks, представленная в виде поверхностной сетки, показана на рис. 5.

Упрощения принятые при расчете:

Расчет проводился без установленной наклонной стенки в нижней части улитки (наклонная стенка п. 9 рис. 3.);

Стенки канала ВУ задавались адиабатными;

Закрутка потока не учитывалась по высоте лопатки.

Таблица 2
Параметры моделируемого потока

Массовый расход газа, кг/с	Температура газа, °C	Скорость газа, м/с	Закрутка потока, град.
44,85	512,00	188,95	10
R, Дж/кг·K			292
k			1,342
P _{вх} , Па			102452
P _{вых} , Па			101300

После газодинамического расчета ВУ в программном комплексе рассчитывался коэффициент потерь полного давления [3], его значение составляет $\sigma_{\Sigma}^* = 0,965$ при скорости $\lambda = 0,365$.



Рис. 5. Расчетная твердотельная модель ВУ ГТУ-12П

2. Аprobация и сравнение методики расчета потерь полного давления с результатами расчета во FlowVision

Аprobация методики делалась на ВУ, подобном ВУ ГТУ-12П. Геометрия ВУ в масштабе 1:10 задана по образцу раздела 3 [2] и приведена в табл. 3 [4].

Расчет потерь был выполнен по «Методике расчета потерь полного давления в выхлопных системах газотурбинных установок с осерадиальными диффузорами и улитками карманного типа. Версия 1.1, 1997 г.». Данная версия является развитием методики, изложенной в разделе 3 работы [2], и содержит регрессионные зависимости поправочных коэффициентов к коэффициенту полноты удара, коэффициенту расхода в выходном сечении диффузора и коэффициенту расхода в улитке.

Для данного ВУ значения коэффициента потерь полного давления в зависимости от приведенной скорости сведены в табл. 3, графики изобра-

жены на рис. 6.

Таблица 3

Результат аprobации методики

λ	σ_{Σ}^*	σ_{Δ}^*
Модель ВУ ГТУ-12П продувка		
0,20	0,990939	0,995380
0,25	0,985898	0,992832
0,30	0,979745	0,989721
0,35	0,972470	0,986033
0,40	0,964048	0,981739
0,45	0,954435	0,976791
0,50	0,943528	0,971092
Аprobация методики расчета потерь		
0,20	0,989317	0,993853
0,25	0,983381	0,990487
0,30	0,976149	0,986412
0,35	0,967619	0,981635
0,40	0,957791	0,976164
0,45	0,946649	0,969995
0,50	0,934164	0,963111
Оптимизация геометрии ВУ		
0,20	0,991632	0,995900
0,25	0,987021	0,993675
0,30	0,981416	0,990973
0,35	0,974819	0,987782
0,40	0,967239	0,984100
0,45	0,958672	0,979903
0,50	0,949089	0,975146

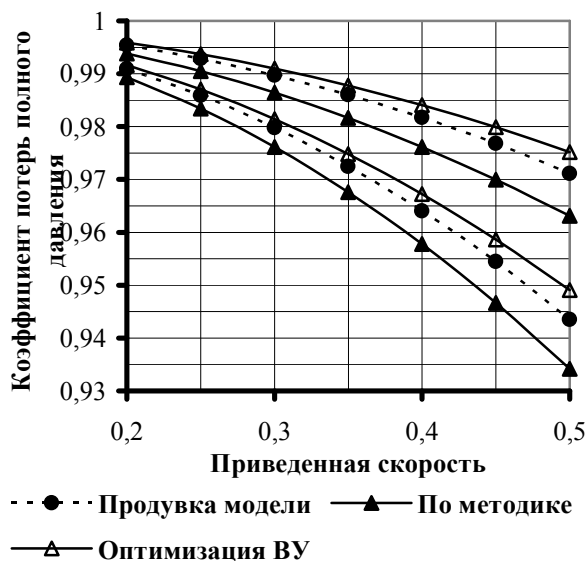


Рис. 6. Распределение коэффициентов потерь полного давления в диффузоре (верхние кривые) и суммарного (нижние)

Как видно, потери в рассчитываемом ВУ существенно превосходят потери в устройстве ГТУ-12П. Для приведенной скорости $\lambda = 0,35$ потери в ВУ превышают на 0,49%, из них превышение в диффу-

зоре составляет 0,44%.

Проведено сравнение суммарных коэффициентов потерь полного давления (при скорости $\lambda = 0,365$), полученных экспериментом и по расчетной методике, с расчетом в программном комплексе FlowVision. Этот расчет проводился без наклонной стенки. Сравнивая результаты расчета во FlowVision с результатами эксперимента (эксперименты № 4 и 5), можно заметить отличие по абсолютной величине коэффициентов потерь $\varepsilon = 0,31\%$. Если распространить влияние наклонной стенки $\delta p = 0,15\%$ на потери в ВУ, то результат расчета в программном комплексе для суммарного коэффициента потерь составит $\sigma_{\Sigma}^* = 0,966$. Это значение находится между двумя кривыми потерь (рис. 6): полученная по методике (первая снизу) и экспериментальная продувка (вторая снизу). Отличие значений по абсолютной величине составляет $\varepsilon = 0,25\%$ и $\varepsilon = 0,26\%$ соответственно.

Рассмотрена возможность снижения потерь при сохранении геометрии улитки, увеличив радиус выхода внешней стенки из диффузора путем добавления на выходе из него прямолинейного участка. Проведенное исследование позволило найти оптимальную величину радиуса. Файл с оптимальными размерами ВУ приведен в табл. 5 [4]. Потери в ВУ снизились на 0,72% из них в диффузоре 0,61% (рис. 6, оптимизация ВУ).

Таким образом, увеличив радиальность диффузора, возможно снизить потери полного давления в выхлопном диффузоре, что соответствует выводам работы [1]. Возможны и другие пути снижения потерь полного давления в ВУ путем оптимизации обводов улитки и диффузора.

Заключение

Проведенное сравнение рассчитанных по методике работы [2], в программном комплексе

FlowVision и полученных экспериментально данных показывает хорошее их согласование, с наклонной стенкой и без стенки ($\varepsilon = 0,25 \dots 0,31\%$). Учитывая точный эксперимент, методика, полученная в работе [2], по результатам продувки ВУ может быть рекомендована как инструмент для проведения проектных инженерных расчетов ВУ. В зависимости от характера и возможности изменений геометрии улитки, можно провести еще дальнейшую оптимизацию потерь полного давления в ВУ.

Литература

1. Довжик С.А. Исследование по аэродинамике осевого компрессора // Труды ЦАГИ. – М. – 1968. – Вып. 1099.
2. Исследование характеристик эжектора, установленного за улиткой выхлопной системы газоперекачивающей станции и апробация методики и программы расчета выхлопной системы / РАУ; рук. темы Н.Н. Пономарёв. – Рига, 1995. – 115 с.
3. Исследование гидравлического сопротивления выходного устройства ГТУ-12ПГ с помощью программного комплекса FlowVision фирмы Tesis / Технический отчет ЗАО «Искра-Энергетика», инв. № 1954; О.В. Фрайфельд. – Пермь, 2002. – 27 с.
4. Сравнение результатов моделирования потерь полного давления по уравнениям Рейнольдса для выходных устройств газотурбинных установок с результатами модельных испытаний / Техническая справка ЗАО «Искра-Энергетика», инв. № 2940; О.В. Фрайфельд. – Пермь, 2003. – 31 с.

Поступила в редакцию 01.06.2004

Рецензент: канд. техн. наук, проф. С.Ф. Минацевич, Пермский государственный технический университет, Пермь.