

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО, канд. техн. наук,
А.П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук, А.С. РУДЕНКО, аспирант

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина*

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОДЕТАНДЕРА С ПОВОРОТНЫМИ ДИАФРАГМАМИ

Розроблено алгоритм вирішення оптимізаційної задачі для турбодетандера з урахуванням змінного режиму роботи. Проведено розрахункові дослідження впливу розподілення кутів виходу з соплового апарату (α_1) по проточній частині на ефективність в залежності від режиму роботи. Виконано оптимальне проектування турбодетандера з поворотними діафрагмами. Наведені та проаналізовані результати розрахунків.

Solution algorithm for the task of optimal design of turbine expander with taking into consideration changing schedule loading was developed. Computational researches of influence of the nozzles outlet angles (α_1) distribution along the flow path subject to mode of operation were performed. Optimal design of turbine expander with rotary diaphragms has been made. Calculations results are given and studied.

Известно, что годовой график потребления природного газа имеет огромную неравномерность. Как правило, потребление газа существенно увеличивается в осенне-зимний и снижается в весенне-летний период, что зачастую обусловлено температурным режимом окружающей среды. Для газоперекачивающих и газораспределительных компаний особо актуальным остаётся вопрос повышения эффективности и надёжности утилизационных турбодетандерных установок (УТДУ), которые используются для понижения параметров природного газа перед подачей потребителю. Неравномерный график потребления природного газа (расход рабочего тела через проточную часть (ПЧ) очень часто находится в интервале от 30 до 125 % от номинального), приводит к глубоко нерасчётным режимам эксплуатации УТДУ и отрицательному влиянию на их эффективность и срок службы.

Из вышесказанного очевидна необходимость учёта изменения режимов эксплуатации турбоагрегата еще на уровне проектирования ПЧ, т.е. при выборе его конструктивных параметров. Это касается и конструкций УТДУ с наличием поворотных диафрагм СА и без их наличия. Проведенные расчётные исследования показали, что выполнение поворотных диафрагм позволяет расширить диапазон рабочих нагрузок турбоагрегата и повысить эффективность ПЧ, но здесь возникает проблема «правильного» подбора углов выхода из СА для каждого режима работы. Обычно, при определении углов α_1 в зависимости от изменения расхода рабочего тела через ПЧ турбоагрегата принимают линейные законы их изменения для всех ступеней ПЧ. Однако такое распределение углов не позволяет получить максимальный эффект от поворота всех диафрагм, очевидно, что для получения большего эффекта, диафрагмы должны поворачиваться независимо друг от друга, а углы поворота СА должны определяться с помощью соответствующих оптимизационных алгоритмов.

В существующих методиках для учёта переменного режима работы турбоагрегата на уровне проектирования зачастую усредняют значения режимных параметров, известных из графика потребления природного газа и проектируют ПЧ

турбоагрегата на данный усреднённый режим. Однако следует понимать, что в процессе эксплуатации турбоагрегат большую часть времени будет работать в области, не совпадающей с усредненным режимом, и как следствие с низкой эффективностью. Такой подход учета графика эксплуатационных нагрузок на этапе проектирования не позволяет в полной мере задействовать имеющиеся потенциальные резервы повышения эффективности ПЧ УТДУ и практически не позволяет достигнуть ожидаемого эффекта.

Учитывая актуальность отмеченной выше проблемы и практическое отсутствие методов и рекомендаций по ее эффективному решению, делает эту задачу особенно важной и требующей для ее решения разработки нового подхода и алгоритмов многопараметрической оптимизации ПЧ УТДУ с учетом режимов их эксплуатации, в конструкции которых предусматривается использование поворотных СА всех ступеней. На настоящий момент накоплен огромный опыт решения задач оптимального проектирования ПЧ турбомашин [1]. Вместе с тем, существующие методики и алгоритмы предназначены для оптимизации конструктивных параметров ПЧ без учета режимов их эксплуатации и для конструкций, в которых геометрия ПЧ в процессе работы остается неизменной. Одним из эффективных направлений в решении таких задач является подход, заключающийся в использовании теории планирования эксперимента [2] и представлении всего процесса оптимального проектирования в виде подчиненно-взаимосвязанных блочно-иерархических оптимизационных процессов [3, 4]. Такой прием позволяет общую задачу поиска оптимальных значений конструктивных параметров разнести по уровням иерархии, образованных в соответствии с конструктивной (узловой) подчиненностью объектов проектирования, что в свою очередь существенно упрощает задачу и предоставляет проектировщику принципиальную возможность получения ее решения при достаточно большом числе степеней свободы (конструктивных параметров) в процессе определения оптимальной конструкции ПЧ. Принимая во внимание высокую эффективность и надежность такого алгоритма, воспользуемся его преимуществом и возможностями для разработки методики и алгоритмов оптимального проектирования ПЧ УТДУ, работающих в глубоко нерасчётных режимах и с изменяющимися от режима к режиму положениями СА всех ступеней. Для успешного решения поставленной задачи осуществим некоторые обобщения выбранной методики оптимального проектирования [3]. Очевидно, что эффективность и надежность этой методики во многом обеспечивается организацией соответствующего межуровневого обмена информацией о различных состояниях объекта проектирования. При передаче вниз по иерархии, используется информация, сгенерированная с помощью методов теории планирования эксперимента, а при передаче вверх по иерархии – информация, полученная в результате решения локальных оптимизационных задач для подчиненных узлов ПЧ осевой турбины.

По существу в процессе обмена информацией между верхними и нижними уровнями проектирования (оптимизации) присутствуют только «базовые» конструктивные параметры, т.е. параметры, не изменяющие своё значение в процессе эксплуатации. Вместе с тем, учитывая особенности стоящей перед нами задачи, требуется соответствующая доработка и совершенствование существующей методики. Вызвано это, с одной стороны, необходимостью осуществления оценки эффективности конструкций ПЧ, работающих в условиях переменных нагрузок в процессе эксплуатации и, с другой – необходимостью решения локальных оптимизационных задач по определению оптимального закона изменения конструктивных параметров ПЧ, например углов установки поворотных СА, в зависимости от режима работы УТДУ. В этом случае, требуется добавление к существующему алгоритму

многоуровневой оптимизации дополнительного блока, обеспечивающего учет отмеченных выше особенностей, связанных с наличием нерасчётных режимов и конструкцией ПЧ. Включение такого блока в виде параллельного алгоритма с обеспечением соответствующего информационного обмена с основным блоком многоуровневой оптимизации существенно расширяет возможности, повышает степень универсальности методики и принципиально позволяет решать задачи оптимального проектирования в трёх основных постановках:

- оптимальное проектирование ПЧ, работающей на одном – номинальном режиме;
- оптимизация «базовых» параметров ПЧ, с учётом заданного графика изменения нагрузки;
- оптимизация «базовых» и «режимных» конструктивных параметров ПЧ, работающей в условиях переменной нагрузки с известным графиком ее изменения.

При использовании модифицированной методики, задача оптимизации параметров осевых турбин на номинальный режим, становится частным случаем общего алгоритма. В такой задаче количество режимов сводится к одному – номинальному.

Следует отметить, что дополнительный блок превращает информационное пространство задач оптимального проектирования [3] из «плоского» в пространство, имеющее новую компоненту – компоненту, связанную с учетом режимных факторов и их влиянием на эффективность конструкции. Обеспечение обмена значениями соответствующих параметров между новой компонентой и основным (базовым) блоком алгоритмов предпочтительно осуществлять в рамках единого информационного пространства (ЕИП) САПР «Турбоагрегат» [5], одной из главных особенностей которого является возможность организации высокоэффективных процессов информационного обмена в задачах оптимального проектирования турбоагрегатов, в т.ч. и при оптимизации параметров ПЧ осевых турбин.

В общем виде задача оптимального проектирования ПЧ УТДУ с использованием модифицированной методики будет выглядеть следующим образом:

$$\max F_{\text{баз}} \left(\vec{u}_{\text{баз}}, \sum_{i=1}^n \left(\max F_{\text{реж}} \left(\vec{u}_{\text{баз}}, \vec{u}_{\text{реж}}, \vec{B} \right) \right) \right), \quad (1)$$

где $F_{\text{баз}}$ – целевая функция на «базовом» уровне,

$F_{\text{реж}}$ – целевая функция «режимного» блока,

$\vec{u}_{\text{баз}}$ – вектор «базовых» конструктивных параметров,

$\vec{u}_{\text{реж}}$ – вектор «режимных» конструктивных параметров, т.е. параметров,

значения которых изменяются в процессе эксплуатации,

\vec{B} – вектор параметров, определяющих режимы работы,

i – номер режима,

n – количество режимов.

Такая существенная модификация известной методики оптимизации естественно требует тщательного и взвешенного подхода. Наиболее правильным здесь будет использовать процесс, базирующийся на поэтапной проверке и реализации вышеизложенного подхода. Для начала, общую задачу оптимального проектирования УТДУ можно разделить на два отдельных этапа, тем самым несколько упростив её:

1. Оптимизация «базовых» параметров для заданного графика изменения нагрузки;

2. Оптимизация эффективных углов α_1 сопловых решеток и как следствие определение оптимальных углов установки каждой ступени для каждого режима работы.

Рекурсивный алгоритм многоуровневой оптимизации параметров ПЧ осевых турбин [3] позволяет решить первую задачу, так как при оптимальном проектировании выбор конкретного варианта конструкции ведется не по условию максимума критерия качества, полученного не для усредненного режима, а по условию максимума усредненного по режимам критерия качества с учетом параметрических и функциональных ограничений.

Задача второго этапа решалась с помощью одноуровневого варианта рекурсивного алгоритма оптимизации для каждого режима работы УТДУ. В качестве варьируемых параметров использовались углы α_1 (с обеспечением соответствующего изменения значений геометрических углов входа) всех СА.

Ниже приведены результаты предварительного исследования по оптимизации углов выхода потока (задача 2) для исходного варианта конструкции УТДУ, а также результаты проектирования 4-х ступенчатого турбодетандера с учётом переменного режима его работы, полученные с помощью последовательного решения оптимизационных задач 1 и 2. Рабочее тело – природный газ. Отличительной особенностью данного агрегата является очень широкий диапазон изменения рабочих нагрузок, а также наличие поворотных диафрагм СА у всех ступеней. Массовый расход рабочего тела через ПЧ агрегата, в зависимости от режима работы, изменялся в пределах от 4,94 до 20,66 кг/с (расход на номинальном режиме $G_{ном} = 16,66$ кг/с).

В процессе оптимизации, в качестве параметра определяющего эксплуатационную нагрузку выступал массовый расход природного газа через ПЧ при фиксированном теплоперепаде ($P_0 = 1,2$ МПа, $t_0 = 110$ °С, $P_2 = 0,19$ МПа). Регулирование массового расхода рабочего тела через ПЧ осуществляется поворотом СА (изменением углов выхода α_1) всех ступеней.

На первом этапе оптимизации конструкции ПЧ определялись оптимальные значения «базовых» геометрических параметров (d_k , d_{cp}/l , β_2 , Z , b). На втором этапе осуществлялся поиск лучших комбинаций «режимных» конструктивных параметров (углов α_1) для каждого режима работы.

Оптимизация проводилась с учетом 12 режимов (месяцев) работы турбодетандера. Была выбрана двухуровневая постановка задачи проектирования. Распределение варьируемых параметров по ступеням ПЧ приведено на рис. 1.

Корневой диаметр d_k 3-й ступени определялся линейной интерполяцией между диаметрами 2-й и 4-й ступеней.

На уровне «Ступень» оптимизация проводилась по параметрам b_1/l_1 , b_2/l_2 , t_1/b_1 , t_2/b_2 . Оптимальные b_1/l_1 , b_2/l_2 , t_1/b_1 , t_2/b_2 , преобразованные к числам лопаток (Z_1 , Z_2) и хордам (b_1 , b_2), передавались на уровень «Цилиндр».

Предварительно для исходной ПЧ были проведены расчётные исследования, цель которых – проверить целесообразность и необходимость решения второго этапа задачи оптимизации (определение оптимальных углов α_1 для каждого режима работы). На рис. 2 приведено распределение КПД по режимам работы для исходной конструкции ПЧ с равномерным поворотом всех диафрагм и с независимым – оптимальным (полученным в рамках данного исследования).

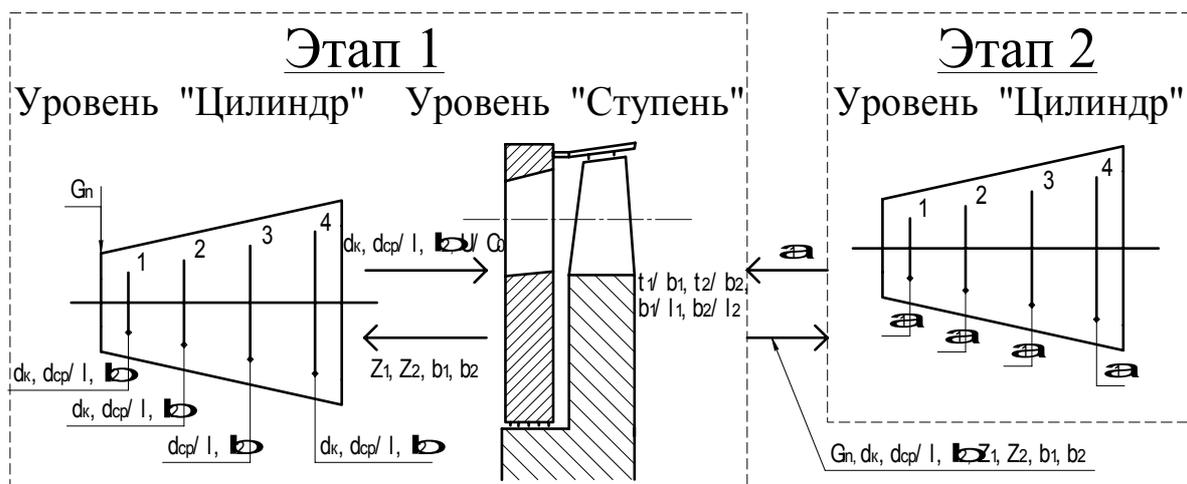


Рис. 1. Варьируемые параметры

Как видно из рис. 2 вариант с оптимальными углами существенно превосходит по уровню эффективности вариант с равномерным поворотом диафрагм на малорасходных режимах. На режимах работы с массовыми расходами через ПЧ близкими и большими номинального не произошло повышения эффективности, т.к. полученные в результате оптимизации углы α_1 практически совпали с углами для исходной ПЧ при линейном законе их изменения в этом диапазоне расходов.

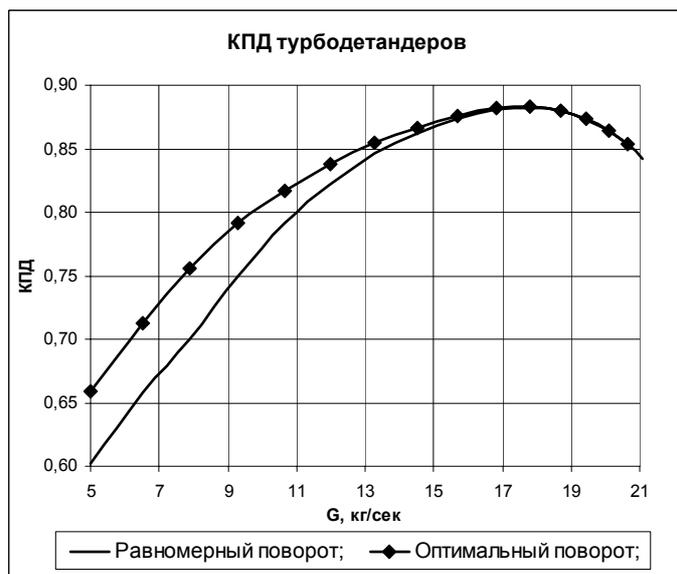


Рис. 2. КПД исходной ПЧ с различными способами установки углов α_1

У варианта с оптимальными углами α_1 , особенно на малорасходных режимах, имеет место существенное перераспределение располагаемых теплоперепадов между ступенями. Значительно увеличилась нагрузка на 1-ю ступень и соответственно уменьшилась на оставшиеся ступени УТДУ. Такое перераспределение приводит к незначительному снижению эффективности 1-й ступени, по сравнению с вариантом с равномерным поворотом СА и существенному улучшению условий работы последующих 3-х ступеней, обеспечивая тем самым повышение эффективности всей ПЧ.

Проведенные предварительные расчётные исследования и полученные результаты подтвердили целесообразность решения задач оптимального проектирования вида(1). Кроме того, решая задачи второго этапа оптимизации (определение оптимальных углов α_1 для каждого режима работы) можно повышать эффективность существующих ПЧ УТДУ с поворотными диафрагмами.

Критерием качества для оценки эффективности ПЧ при решении общей оптимизационной задачи в соответствии с [6] была выбрана величина, равная

суммарной работе цилиндра $U = \int_{t=0}^{t=T} N(t)_{\text{цил}} dt$ за выбранный отрезок времени (T). С учетом допущения о том, что продолжительность режимов одинакова (1 месяц), данный критерий был сведен к сумме «режимных» мощностей цилиндра $\left(\sum_1^{12} N_{\text{цил}} \right)$.

Так как данная задача решалась для ПЧ с атласными сопловыми профилями (Н-2-35), то при варьировании угла α_1 учитывалось и соответствующее изменение геометрического угла входа СА ($\alpha_{0Г}$). При расчёте потерь, связанных с ударами на входе в решетку, учитывались углы нечувствительности профилей к удару в соответствии с атласными данными.

Геометрические углы входа на РК для каждой ступени определялись усреднением их значений по режимам с учетом весовых долей критерия качества каждого режима.

Полученные в результате решения задачи первого этапа оптимального проектирования «базовые» конструктивные параметры приведены в таблице 1 и проиллюстрированы на рис. 3.

На втором этапе во всем диапазоне изменения расхода с шагом 1 кг/сек для оптимальной конструкции ПЧ первого этапа были найдены оптимальные углы (α_1) СА. Полученные распределения углов α_1 для каждой ступени ПЧ как функции изменения расхода представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4 оптимальные зависимости углов сильно отличаются от линейной зависимости, получаемой при равномерном одновременном повороте СА.

На рис. 5 представлены коэффициенты полезного действия (КПД) исходной конструкции ПЧ с равномерным поворотом всех СА и КПД конструкции, полученной в результате оптимального проектирования с оптимальным законом изменения углов α_1 по режимам работы.

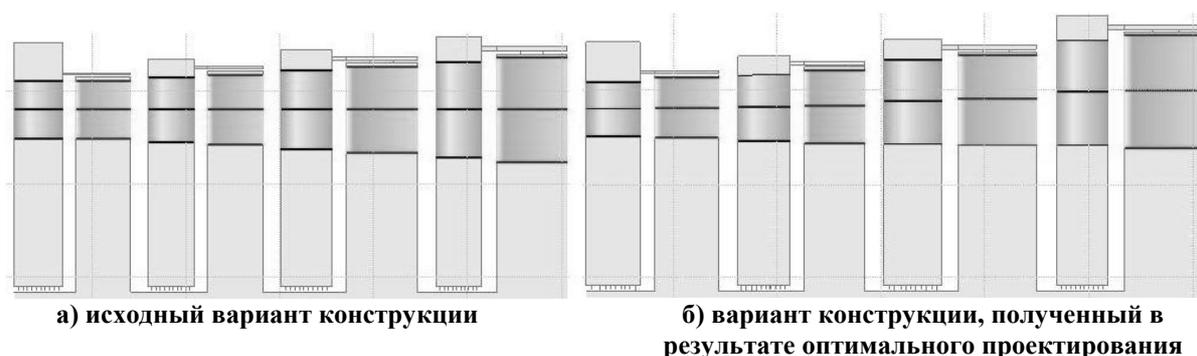


Рис. 3. Обводы проточных частей

Эффективность ПЧ, полученной при решении оптимизационной задачи вида (1), существенно превосходит эффективность исходной ПЧ на всех режимах работы (рис. 5). На некоторых режимах прирост КПД составил около 5 %, а дополнительная выработка электроэнергии за эксплуатационный цикл равна 914,793 МВт·ч (3,64 %).

Таблица 1. Результаты 1-го этапа оптимального проектирования

Наименование параметра	Номер ступени				Номер ступени			
	Исходный вариант				Оптимальный вариант			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Средний диаметр СА – D_{CA} , м	0,48	0,48	0,48	0,48	0,481	0,483	0,489	0,498
Средний диаметр РК – D_{PK} , м	0,48	0,48	0,48	0,48	0,482	0,484	0,49	0,499
Высота сопловой лопатки – l_{CL} , м	0,0305	0,035	0,0425	0,051	0,029	0,036	0,045	0,056
Высота рабочей лопатки – l_{PL} , м	0,031	0,0375	0,0465	0,056	0,032	0,039	0,049	0,06
Угол выхода из РК – β_2 , град	22	25,7	29,1	34	21,7	25,52	28,43	34,15
Число сопловых лопаток – Z_C , шт	54	54	46	46	54	58	48	49
Число рабочих лопаток – Z_L , шт	69	69	53	53	69	78	61	59
Хорда сопла – b_{CL} , мм	35,099	35,099	42,118	42,118	35,345	35,257	42,034	42,761
Хорда рабочего профиля – b_{PL} , мм	30,809	30,809	40,15	40,15	33,25	30,179	39,187	40,754
Геометрический угол входа РК – $\beta_{1Г}$, град	30,75	35,68	44,03	53,72	38,21	32,27	38,97	48,31

Рассмотрим некоторые особенности работы исходной и оптимальной конструкций ПЧ на предполагаемых режимах работы. Очевидно, что невозможно создать ПЧ, одинаково хорошо работающую в диапазоне нагрузок от 30 до 125 % от номинальной. Так КПД любой ПЧ на малорасходных режимах остаётся на достаточно низком уровне в следствии наличия глубоко нерасчётных углов натекания, отрицательных степеней реактивности, существенного перераспределения располагаемых теплоперепадов, смещение U/C_0 ступеней в сторону от оптимальных значений. Этот факт является общим и присущ в большей или меньшей мере всем конструкциям УТДУ с регулируемыи СА. Выигрыш оптимального варианта, по сравнению с исходным вариантом ПЧ, на малорасходных режимах обеспечен, в большей мере благодаря результатам, полученным на втором этапе решения общей оптимизационной задачи (подбор оптимальных углов α_1). Как видно из рис. 4 для оптимального варианта УТДУ на малых расходах угол α_1 1-й ступени принимает существенно меньшие значения по сравнению с углами последующих ступеней, что увеличивает её располагаемый теплоперепад и скорость выхода потока из сопловой решетки (скорость C_1 близка к скорости звука).

Несмотря на некоторое ухудшение эффективности 1-й ступени, такое решение позволило разгрузить последующие ступени и существенно улучшить условия их работы (удалось добиться положительной степени реактивности на среднем радиусе второй и третьей ступеней) и получить положительный итоговый результат. На режимах работы с массовым расходом близким или превосходящим номинальный, повышение эффективности ПЧ стало возможным в большей мере благодаря первому этапу решения общей оптимизационной задачи (подбор оптимальной комбинации d_k , d_{cp}/l , β_2 , Z , b для каждой ступени), вследствие чего уменьшились потери, связанные с натеканием рабочего тела на решётки (ударами), снизились потери с выходной скоростью, повысилась эффективность сопловых и рабочих решёток.

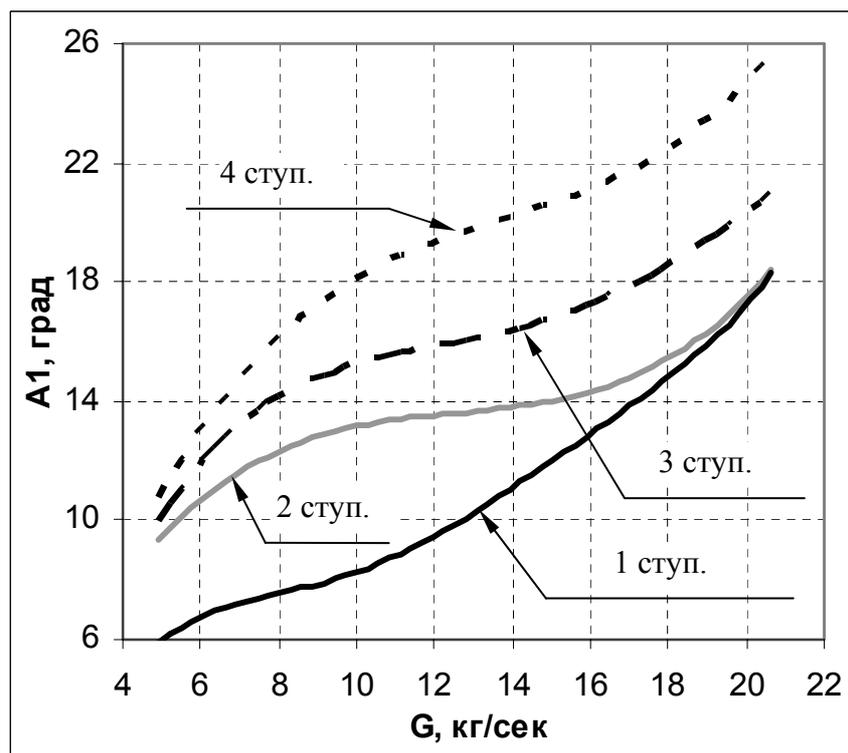


Рис. 4. Оптимальное распределение углов α_1 по ПЧ в зависимости от расхода

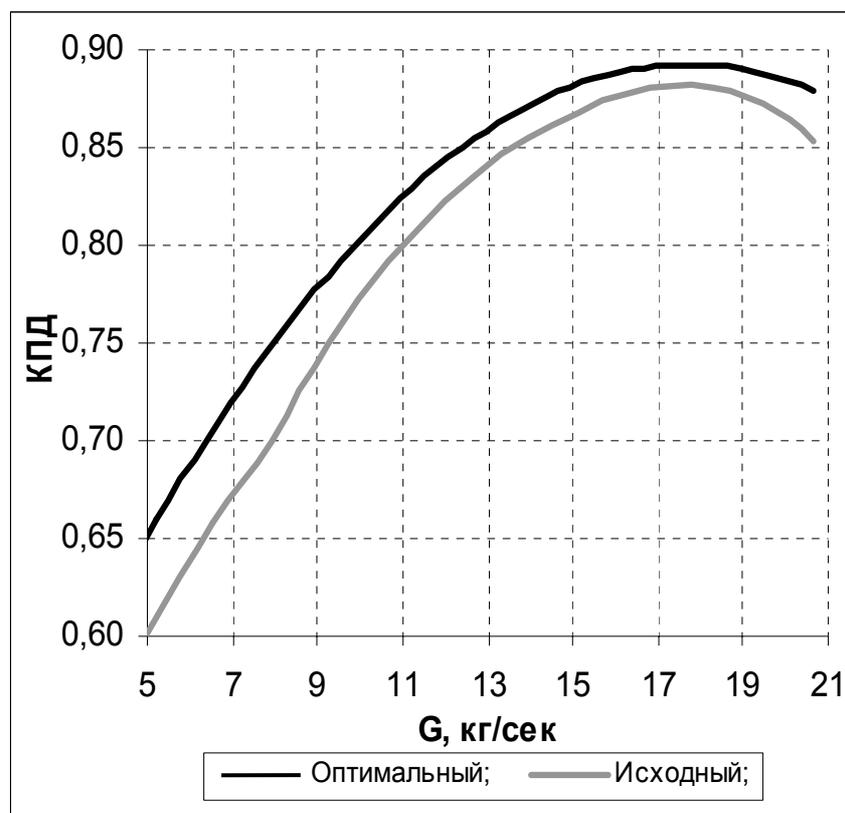


Рис. 5. КПД турбодетандеров

Выводы

1. Результаты проведенных исследований показали целесообразность и необходимость проектирования турбоагрегатов, работающих в переменном режиме, с учетом фактора эксплуатационных нагрузок.

2. Использование предложенной модификации алгоритма многоуровневой оптимизации позволяет расширить класс решаемых с ее помощью задач оптимального проектирования ПЧ и получать эффективные конструкции УТДУ.

3. Подтверждена адекватность выбранного критерия качества, определяемого как сумма «режимных» мощностей цилиндра в задачах оптимизации ПЧ осевых турбин, работающих с переменным графиком нагрузки.

4. Полученная с использованием усовершенствованной методики оптимизации конструкция ПЧ УТДУ во всем диапазоне изменения массового расхода обеспечивает выигрыш по вырабатываемой мощности и КПД благодаря оптимальному сочетанию 32 «базовых» конструктивных параметров ($d_{ср}$, l_1 , l_2 , $\beta_{1Г}$, β_2 и т.д.) и оптимальному закону изменения «режимных» конструктивных параметров (углов α_1).

5. Выполнение всех СА ПЧ в виде поворотных диафрагм позволяет существенно расширить диапазон рабочих нагрузок, а также увеличить эффективность турбодетандера на переменных режимах работы.

6. Результаты второго этапа решения оптимизационной задачи показывают, что, при изменении режима работы, СА должны поворачиваться независимо друг от друга, а углы поворота СА должны определяться с помощью оптимизационных алгоритмов.

Литература

1. *Бойко А.В.* Оптимальное проектирование проточных частей осевых турбомашин – современное состояние / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 2. – С.14-21.

2. *Vox E.P., Behnken D.W.* Some new three-level Design for the Study of Quantitative Variables // Technometrics. – 1960. – Т 2, № 4. – P. 455-475.

3. *Бойко А.В.* Многоуровневая оптимизация параметров проточной части осевых турбин с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 26-30.

4. *Бойко А.В.* Аэродинамический расчёт и оптимальное проектирование проточной части осевых турбин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко и др. – Монография. Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.

5. *Бойко А.В.* Особенности информационного обмена в рамках единого информационного пространства САПР «Турбоагрегат» / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 11-15.

6. *Бойко А.В.* Результаты оптимального проектирования турбодетандера с учётом переменного режима работы / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 33-39.

© Бойко А.В., Говорущенко Ю.Н., Усатый А.П., Руденко А.С., 2008