

# РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ И ОПЫТ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ АГРЕГАТОВ

Ю. Б. Галеркин, А. Ф. Рекстин, В. Б. Семеновский, Л. Н. Маренина,  
О. А. Соловьёва, А. А. Дроздов, Л. Н. Розанов, П. Н. Броднев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

**Процесс проектирования нового турбодетандерного агрегата по Методу универсального моделирования состоит из нескольких этапов: первичное проектирование, оптимизация, расчет газодинамических характеристик. Развитие современных вычислительных методов и накопление результатов экспериментальных исследований позволили усовершенствовать математические модели в области расчета и проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов. В полученную модель входят 22 эмпирических коэффициента, погрешность расчетов составляет 1,8 %, что является достаточным для ее практического применения в проектной деятельности.**

**Ключевые слова:** центробежный компрессор, турбодетандерный агрегат, коэффициент теоретического напора, условный коэффициент расхода, КПД, математическая модель.

## Введение

Рабочий процесс центробежных компрессоров исключительно сложен. Разнообразны формы и соотношения размеров проточной части. Приемы их проектирования и расчета базируются на результатах экспериментов, количество которых не может быть достаточным для решения всех научных и прикладных задач. Ученые и инженеры вынуждены интерполировать и экстраполировать экспериментальные данные на неизученные объекты. Для этого нужны некие физические модели и их математическое описание.

Создателем первой научной школы по промышленным центробежным компрессорам стал В. Ф. Рис на Невском машиностроительном заводе. Его наработки лежат в основе Ленинградской — Санкт-Петербургской школы К. П. Селезнева. К. П. Селезнев возглавил кафедру и Проблемную лабораторию компрессоростроения в самом конце 1950-х гг.

В решении задач исследования и расчета центробежных компрессоров значительную роль сыграла научная группа Ю. Галеркина «Рабочие процессы турбокомпрессоров». На основе физических и вычислительных экспериментов была разработана концепция и создан метод газодинамического проектирования центробежных компрессорных ступеней и математического моделирования их характеристик (инженерного метода расчета).

1990-е гг. стали периодом, когда Метод универсального моделирования — метод проектирования и набор ПК-программ с математическими моделями для оптимального проектирования — достиг уровня совершенства, достаточного для надежного практического применения [1–4]. Научная группа Ю. Галеркина приняла участие в программе «Урал-Газпром». По заданиям ОАО «Компрессорный комплекс», ПАО «НПО «Искра», г. Пермь, АО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» был разработан

ряд проектов компрессоров мощностью 4–25 МВт с конечным давлением до 120 ата, количеством ступеней от 2 до 8. ПК-программы 4-й версии обеспечивали надежное получение обусловленных ТЗ параметров, поэтому заказчики отказались от обязательной ранее экспериментальной проверки на моделях. Работа получила высокую оценку со стороны компрессоростроителей и Газпрома, отраженную в публикации органа Правительства РФ — публикация [5].

До середины 2000 годов интенсивная работа с компрессоростроителями продолжалась на основе 4-й версии Метода универсального моделирования. За все прошедшие годы по проектам научной группы было построено более 500 компрессоров с общей мощностью 5 млн кВт. Четвертая версия позволяет надежно обеспечить конечное давление и КПД проектируемого компрессора при определенном искусстве проектировщика. Для каждого проекта необходим индивидуальный подбор эмпирических коэффициентов.

Накопленный опыт позволил поставить задачу совершенствования Метода универсального моделирования. В данной статье рассмотрены вопросы развития и модернизации математических моделей Метода универсального моделирования.

## Опыт проектирования центробежных компрессоров ТДА и совершенствования математических моделей их оптимального расчета и проектирования

Турбодетандеры агрегаты (ТДА), иногда называемые «детандер-компрессорные агрегаты», применяются как на газоперерабатывающих заводах, так и на головных станциях добычи газа. В зонах распространения многолетнемерзлых грунтов (в криолитозоне) на компрессорных станциях применяются агрегаты круглогодичного охлаждения газа [6]. В большинстве случаев ТДА применяются в составе

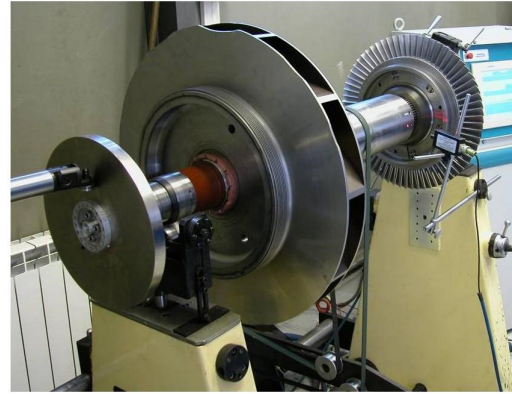
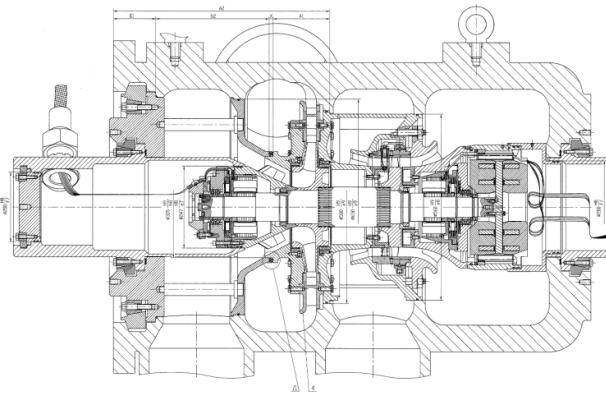


Рис. 1. Продольный разрез ТДА на магнитных подшипниках (слева) [9] и ротор ТДА (справа) [10]  
 Fig. 1. Longitudinal section of turboexpander unite on magnetic bearings (left) [9] and turboexpander rotor (right) [10]

Таблица 1. Перечень компрессоров турбодетандерных агрегатов по газодинамическим проектам Методом универсального моделирования – СПбПУ. Проектирование, изготовление, испытание, поставка конечному потребителю — АО «Турбохолд», г. Москва

Table 1. List of compressors of turbo-expander units for gas-dynamic projects Using the Universal Modeling Method — SPbPU. Design, manufacture, testing, delivery to the end user — JSC «Turbohold», Moscow

№	Назв.	Мощ./год кВт	$D_2$ м	$\bar{m}$ , кг/с	$P_k$ МПа	$\sigma$	$n$ , об/мин	К-во 2015	Суммарная мощн.	Место установки
1	ТК-1	2350/2005	0,320	59	11,8	1,311	15500	1	2400	Опытный образец
2	ТК-2	3650/2005	0,365	79	8,0	1,333	15500	н.д.	н.д.	н.д.
3	ТК-3	2670/2006	0,365	78,1	8,906	1,22	14000	10	26700	Песцовое, Харвугинское
4	ТК-4/0706	5030/2007	0,375	79	6,75	1,424	15500	н.д.	н.д.	н.д.
5	ТК-4/530	5030/2007	0,390	79	6,75	1,424	16250	10	50300	Бованенково
6	ТК-5	3080/2007	0,350	77,7	7,75	1,277	16000	7	21500	Заполярное
7	ТК-6	1850/2007	0,575	163	8,69	1,070	5000	22	40700	Ярынская
8	ТК-7	2400/2007	0,275	86,3	13	1,209	16000	6	14400	Юрхарово
9	ТК-8	1660/2007	0,275	59,19	13	1,209	16000	4	6600	Юрхарово
10	ТК-4/410	5580/2009	0,410	79	6,75	1,424	14500	30	167400	Бованенково
11	ТК-3а	1200/2010	0,365	59	8	1,12	12000	4	4800	Находкинское
12	ТК-8а	1660/2010	0,24	59	10,8	1,18	16000	1	1660	Г.д. Ямбург
13	ТК-10	2099/2012	0,310	36,05	13,02	1,32	16500	н.д.	н.д.	н.д.
14	ТК-11	3231/2012	0,310	103,5	12,2	1,208	15000	н.д.	н.д.	н.д.
15	ТК-11А	3320/2012	0,340	105,3	12,2	1,208	13280	1	3300	Юрхаровское
16	ТК-12	1792/2012	0,275	60,5	13	1,244	15500	3	5400	Самбургское
17	ТК-13	1962/2013	0,300	85,19	12,53	1,171	13300	4	7800	Ачимовское
18	ТК-14	3651/2013	0,320	84,0	14,2	1,365	16000	н.д.	н.д.	н.д.
19	ТК-14А	2290/2013	0,340	84,0	12,5	1,202	12500	2	4600	Яро-Яхинское
20	ТК-15	762/2014	0,490	88,91	5,513	1,072	5100	8	6100	Чаяндинское
21	ТК-16	6363/2017	0,390	88,4	6,3	1,460	16250	1	6400	Бованенково
22	ТК-17	5135/2017	0,400	84,6	6,3	1,406	15900	1	5100	Бованенково
23	ТК-18	680/2018	0,280	27,26	5,398	1,169	15500	3	2000	Узбекистан
25	ТК-21	3282/2020	0,300	104,9	13,41	1,23	15000	8	26300	Салман
26	ТК-22	2703/2020	0,340	90,16	7,461	1,26	13500	В процессе изготовления		Ковыткинское
27	ТК-23	1628,9	0,305	31,6	5,977	1,406	18800	В процессе изготовления		Ево-Яхинское
28	ТК-24	2814,5	0,330	54,414	5,879	1,384	17500	В процессе изготовления		Ево-Яхинское
29	ТК-27	4370	0,415	93,4	4,9	1,316	13495	В процессе изготовления		Харасавэй
	ВСЕГО								126	401800

низкотемпературной установки комплексной обработки газа (УКПГ) [7] на головной станции добычи газа, а в отдельных случаях — и на линии транспорта газа.

Потребность в ТДА на месте добычи газа связана с прохождением газопровода через зону вечной мерзлоты. В этом случае необходимо охлаждать газ до минус 20 °С, чтобы избежать необратимого растепления грунта.

Потребность в ТДА различного назначения до 2035 г. только на объектах ПАО «Газпром» для оснащения и реновации УКПГ оценивается в 113 единиц [8].

Научный коллектив сектора компрессоростроения ВШЭМ ИЭ СПбПУ под руководством д.т.н., проф. Ю. Б. Галеркина сдал заказчику уже 27-й проект компрессора для турбодетандерного агрегата. Индустриальный партнер — АО «Турбохолод» выпустил более сотни ТДА с компрессорами, которые спроектированы с использованием Метода универсального моделирования разных версий. АО «Турбохолод» снабжает газовую промышленность агрегатами с осевой турбиной и центробежным компрессором (рис. 1).

В табл. 1 представлена информация о проектах научной группы д.т.н., проф. Ю. Б. Галеркина компрессоров ТДА по информации АО «Турбохолод». (В табл. 1 представлены только компрессоры, уже поставленные заказчиком (где  $\bar{m}$  — массовый расход;  $p_k$  — давление нагнетания;  $D_2$  — наружный диаметр рабочего колеса;  $\pi$  — отношение давлений;  $n$  — частота вращения ротора.)

Размерные и безразмерные параметры компрессоров лежат в пределах:

- массовый расход 27,26 — 163 кг/с;
- объемный расход по параметрам торможения 0,561 — 2,903 м<sup>3</sup>/с;
- конечное давление 5,398 — 13,2 МПа;
- диаметр рабочего колеса 0,257 — 0,575 м;
- число оборотов 5100 — 16500 об/мин;
- окружная скорость 131 — 332 м/с;
- отношение давлений 1,064 — 1,46;
- расчетный коэффициент расхода 0,0278 — 0,074;
- расчетный коэффициент теоретического напора 0,43 — 0,71;
- расчетное безразмерное число оборотов 0,241 — 0,456.

Все компрессоры ТДА проходят процедуру газодинамических испытаний на воздушном стенде АО «Турбохолод».

Хорошие результаты проектирования удавалось получить благодаря опыту и интуиции авторов проектов. Они делают актуальным применение новейшей 8-й версии модели и компьютерных программ для проектирования компрессоров ТДА. Специфика этих компрессоров требует проверки, верификации модели по результатам испытания, которые проведены на воздухе при заводских испытаниях, и на газе, при измерении параметров на месте эксплуатации. А также необходимость соответствующего усовершенствования математической модели Метода универсального моделирования.

Проектирование Методом универсального моделирования выполняется в следующем порядке:

- применением правил и расчетных формул для нужных значений  $\Phi_{расч}$ ,  $\psi_{расч}$  с учетом критериев подобия и конструктивных ограничений выполняется первичное проектирование, т.е. выделяется форма и соотношение размеров проточной

части при выбранном расчетчиком ожидаемом значении КПД;

- по математической модели расчета потерь напора определяется КПД первичного проекта проточной части и корректируются размеры в случае несовпадения заданного и рассчитанного КПД;

- путем варьирования соотношения размеров проточной части создаются альтернативные варианты, КПД которых рассчитывается. Соответствующий алгоритм оптимизации находит вариант с размерами проточной части, у которого максимальный КПД;

- после оптимизации формы лопаточного аппарата РК на основании диаграмм скоростей невязкого потока по математической модели производится расчет газодинамических характеристик спроектированного компрессора.

### Усовершенствование математической модели расчета газодинамических характеристик МУМ с учетом специфики компрессоров ТДА

Работы по усовершенствованию математической модели МУМ и созданию базы данных модельных ступеней ЦК ТДА представлены в работах [9, 11 — 13]. Для этого были произведены сбор и систематизирование информации о проектных характеристиках и результатах испытаний компрессоров ТДА, изготовленных по газодинамическим проектам, выполненным Методом универсального моделирования. Проектные газодинамические характеристики компрессоров ТДА были сопоставлены с результатами приемосдаточных испытаний на воздухе и испытаний на месте эксплуатации, проведена идентификация современной математической модели Метода универсального моделирования по результатам испытания компрессоров.

Результаты анализа испытания ряда компрессоров ТДА на стенде изготовителя и на месте эксплуатации были проведены с учетом значительного «разброса» КПД и отношения давлений в зависимости от методики испытаний и особенностей конкретно образца компрессора. Характеристики КПД и коэффициента внутреннего напора описаны алгебраическими уравнениями. Эта информация позволяет решить важную прикладную задачу — создать базу данных модельных ступеней для проектирования новых компрессоров на основе газодинамического подобия. По характеристикам модельных ступеней Проблемной лаборатории компрессоростроения семейства 20СЕ проведена идентификация математической модели КПД. Необходимость поиска нового стандартного набора эмпирических коэффициентов 8-й версии математической модели была связана с заменой модели безлопаточных диффузоров. В 8-й версии модель БЛД основана на результатах CFD-расчетов [14 — 18]. Поиск стандартного набора эмпирических коэффициентов для этого варианта выполнен специально для последующей корректировки и использования модели компрессоров ТДА.

Для учета особенностей компрессоров ТДА шероховатость литых поверхностей проточной части была принята равной 200 мкм, а механически обработанных — 6 мкм. Потери во входных патрубках рассчитывались с учетом отношения площадей входного отверстия корпуса и входного сечения рабочего колеса. Этого оказалось достаточно для точного расчета КПД универсальным набором эмпирических коэффициентов в случае компрессора ТК-3.

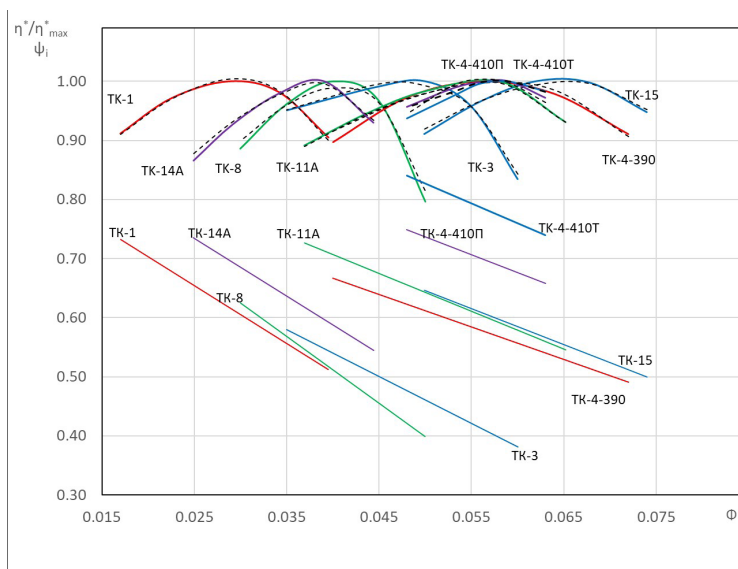


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные характеристики компрессоров ТДА. Политропный КПД — верхние линии, коэффициент внутреннего напора — нижние. Эксперимент — сплошные линии, расчет — пунктирные  
 Fig. 2. Experimental and calculated characteristics of turboexpander compressors. Polytropic efficiency — the upper lines, the coefficient of internal pressure — the lower ones. Experiment — solid lines, calculation — dashed

Для других компрессоров ТДА оказалось необходимым откорректировать коэффициенты, определяющие ударные потери в РК и ЛД на нерасчетных режимах. Рис. 2 демонстрирует точность моделирования характеристик испытанных компрессоров. На рис. 2 сопоставлены экспериментальные и рассчитанные характеристики девяти компрессоров ТДА (КПД отнесен к его максимальному значению).

Совпадение рассчитанного и измеренного отношения давлений практически полное. Небольшое превышение рассчитанного КПД отражает тенденцию улучшения характеристик при условиях эксплуатации по сравнению с заводскими испытаниями.

#### База данных модельных ступеней ТДА

Ступени компрессоров ТДА покрывают значительный диапазон расчетных значений коэффициентов расхода и напора. Это делает перспективным создание базы данных модельных ступеней, по которой можно будет быстро проектировать компрес-

соры в широком диапазоне расходов и отношения давлений.

Испытанные ступени компрессоров ТДА существенно отличаются от использованных при их проектировании аналогов из семейства 20СЕ. Хорошие результаты аппроксимации измеренных характеристик компрессоров ТДА при использовании 8-ой [19, 20] версии математической модели позволяют включить их в базу данных модельных ступеней. Проточные части компрессоров ТДА размещены в унифицированном корпусе, независимо от объемного расхода, со специфической конструкцией входных патрубков. При проектировании новых компрессоров входные устройства могут быть другими. Поэтому в базе данных размещены модельные ступени, имеющие осевой вход. Параметры проектирования представлены в табл. 2.

На рис. 3 приведены рассчитанные характеристики модельных ступеней при тех условных числах Маха, при которых испытывались компрессоры ТДА. Значения других критериев подобия  $k = 1,4$ ;  $Re_u = 6000000$ .

Таблица 2. Параметры проектирования модельных ступеней компрессоров ТДА  
 Table 2. Parameters for designing model stages of turboexpander compressors

№	Название модельной ступени	$\Phi_{расч}$	$\Psi_{Трасч}$	$M_u$	$\bar{D}_{ам}$
1	ТДА-0030/057-0344	0,030	0,570	0,657	0,344
2	ТДА-0039/058-0353	0,039	0,580	0,570	0,353
3	ТДА-0040/051-0400	0,040	0,510	0,555	0,400
4	ТДА-0051/045-0315	0,051	0,450	0,664	0,315
5	ТДА-0058/059-0353	0,058	0,590	0,556	0,353
6	ТДА-0060/067-0280	0,060	0,670	0,710	0,280
7	ТДА-0062/073-0280	0,0620	0,73	0,704	0,280
8	ТДА-00625/056-0300	0,0625	0,560	0,705	0,300
9	ТДА-0070/053-0286	0,070	0,530	0,377	0,286

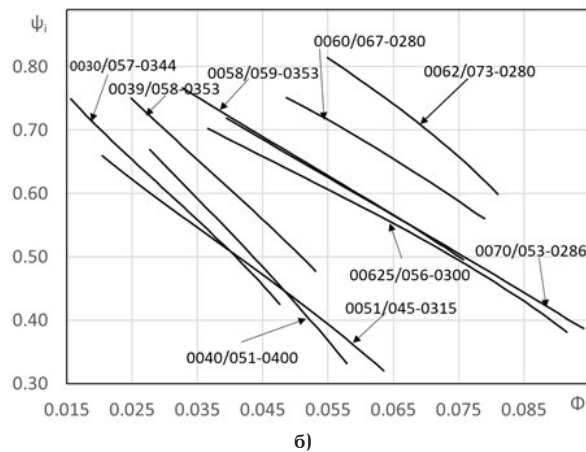
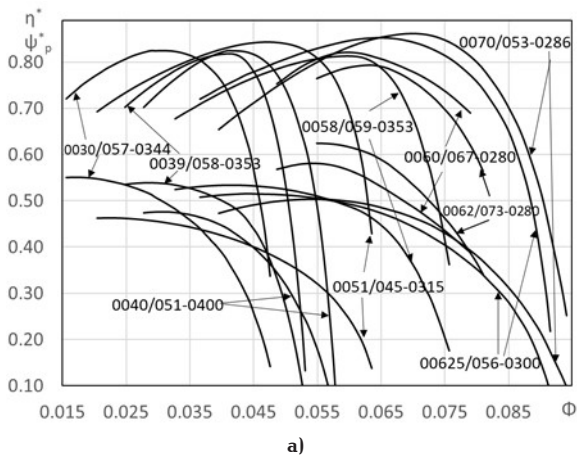


Рис. 3. Характеристики модельных ступеней компрессоров ТДА:  
 а — политропный КПД и коэффициент политропного напора; б — коэффициент внутреннего напора  
 Fig. 3. Characteristics of model stages of turboexpander compressors,  
 а — polytropic efficiency and polytropic head coefficient; б — work coefficient

Модельные ступени перекрывают диапазон расчетных коэффициентов  $\Phi_{расч} = 0,030 - 0,70$ ;  $\psi_{Трасч} = 0,45 - 0,73$ .

#### Корректировка математической модели вариантного расчета ТДА

КПД ступеней, спроектированных по единой, однозначной методике, зависит от параметров проектирования и критериев подобия. Формальное уравнение выглядит следующим образом [21]:

$$\eta_{расч} \approx f(\Phi_{расч}, \psi_{Трасч}, \bar{D}_{вм}, M_u, Re_u, \bar{k}_ш), \quad (1)$$

где  $M_u$  — условное число Маха;  $\bar{k}_ш$  — относительная шероховатость поверхности.

Е. Попова [21] еще на границе 1980–1990-х гг. спроектировала и оптимизировала Методом универсального моделирования порядка 2000 ступеней в пределах значений  $\Phi_{расч} = 0,015 \dots 0,12$ ;  $\psi_{Трасч} = 0,40 \dots 0,50$ ;  $\bar{D}_{вм} = 0 \dots 0,50$ ;  $M_u = 0,50 \dots 1,0$ .

Уравнения из работы [21] использовались в программах Метода универсального моделирования вплоть до 7-й версии 2016 г. А. Рекстин в своей диссертации [22] предложил усовершенствованную версию уравнений. Целесообразность совершенствования системы уравнений вызвана следующими обстоятельствами:

- совершенствование методов проектирования повысило КПД ступеней [23];

- опыт проектирования и расчетов позволил уточнить зависимость  $\eta_{расч}$  от  $\Phi_{расч}$ ;

- в предыдущей системе уравнений не были выделены особенности ступеней с разными диффузорами (безлопаточные диффузоры (БЛД), лопаточные диффузоры (ЛД)).

Опыт проектирования центробежных компрессоров ТДА показал, что использование небольшого ряда унифицированных корпусов для компрессоров, существенно различной производительности, приводит к большим потерям во входном патрубке в случае, если его размеры не могут обеспечить необходимо низкий уровень скоростей в нем. Эта проблема была представлена в публикации [24]. Для учета потерь во входном патрубке в формулу для оценки КПД была внесена поправка на величину потерь во ВП (входной патрубок). Пользователю

дана возможность задать площадь проходного сечения входного патрубка на входе в него и его коэффициент потерь. Исходя из объемного расхода на входе, определяется скорость, с учетом которой рассчитываются потери КПД.

Рабочие колеса ТДА могут быть изготовлены как методом литья, так и фрезерованием. Анализ результатов приемосдаточных испытаний показал, что во втором случае КПД компрессора выше. Для учета влияния механической обработки рабочего колеса в уравнение расчета КПД был введен эмпирический коэффициент  $X(22)$ .

Максимально возможный КПД компрессора ТДА исходя из опыта проектирования порядка 88,5 %. В связи с этим в формулу расчета КПД вместо величины 100 %, из которой вычитаются потери КПД вследствие негативного влияния ряда параметров, задается максимально возможный в теории уровень КПД компрессора ТДА при помощи эмпирического коэффициента  $X(21)$ .

С учетом всех корректировок новая формула имеет вид:

$$\eta_{расч} = X(21) - X(1)K_\phi K_\psi K_{D_{вм}} K_{M_u} - X(22) - \Delta\eta_{вп} + \Delta\eta_{лг}. \quad (2)$$

В полученную математическую модель входят 22 эмпирических коэффициента. Для подбора корректных величин коэффициентов необходимо произвести идентификацию разработанной математической модели вариантного расчета компрессоров ТДА по результатам испытаний модельных ступеней и компрессоров. Под идентификацией подразумевается определение значений эмпирических коэффициентов, входящих в математическую модель, позволяющих получить максимально близкое совпадение расчетных и проектных данных.

Основным экспериментальным материалом для идентификации математической модели являются результаты 25 приемосдаточных испытаний компрессоров ТДА. Графики сопоставления рассчитанных и проектных значений КПД компрессоров показаны на рис. 4.

Новая статистическая модель с подобранными значениями эмпирических коэффициентов показала погрешность 1,8 %, что является достаточным для

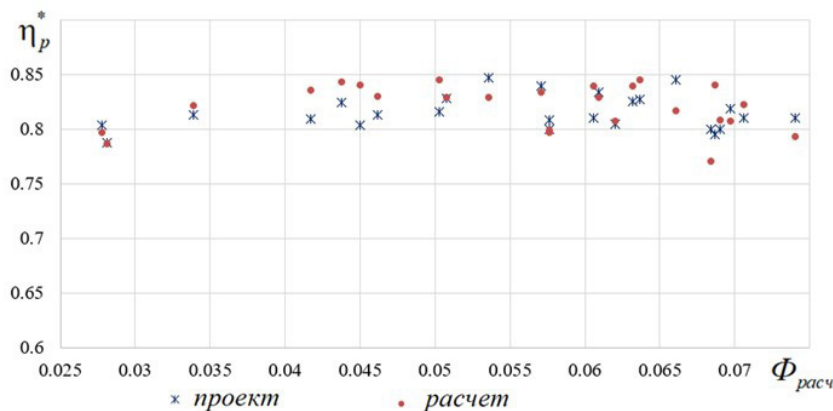


Рис. 4. Результаты идентификации. Сопоставление рассчитанных и проектных значений политропного КПД компрессоров ТДА  
 Fig. 4. Identification results. Comparison of calculated and design values of polytropic efficiency of turboexpander compressors

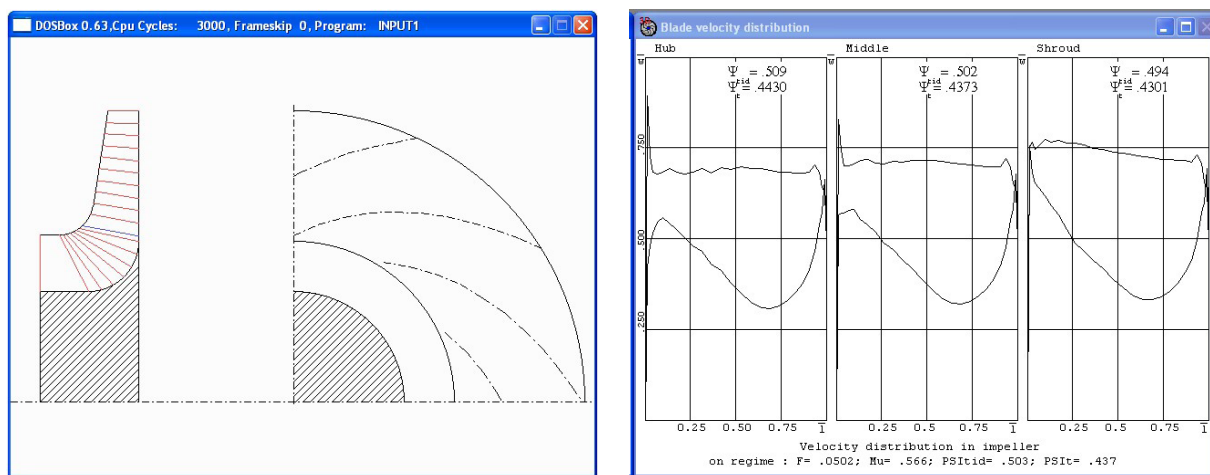


Рис. 5. Форма лопаточной решетки (слева) и диаграммы скоростей невязкого квазитрехмерного потока на лопатках РК (справа) компрессора ТК18 после первичного проектирования  
 Fig. 5. The shape of the blade row (left) and velocity diagrams of the inviscid quasi-three-dimensional flow on the blades of the impeller (right) of the TK18 compressor after the initial design

ее практического применения в проектной деятельности.

#### Пример проектирования компрессора ТДА с использованием новейших версий программ МУМ

В качестве демонстрации подхода к проектированию центробежного компрессора ТДА методом универсального моделирования рассмотрим следующий вариант. Одноступенчатый компрессор с расходом 27 кг/с и конечным давлением 5,4 МПа в соответствии с характеристиками приводной турбины должен работать при 15500 об/мин. Сопоставление различных вариантов исполнения компрессора были произведены в новой версии программы вариантного расчета.

На КПД одноступенчатого компрессора отрицательно влияют большой диаметр вала и потери во входном патрубке. В качестве оптимального выбран вариант с  $\psi_{\text{Трасч}} = 0,435$ . У него чуть меньше КПД, чем у вариантов с большим коэффициентом напора. Но у выбранного варианта более широкая зона работы в сторону меньших расходов, а максимальная мощность совпадает с расчетным режи-

мом, что является важным для турбинного привода.

Для выбранного варианта автоматически выполняется первичное проектирование. Основные размеры проточной части передаются в программу МУМ 9-й версии РХЦК Г9Р.

Оптимизация размеров рабочего колеса производится в программе невязкого квазитрехмерного расчета. На рис. 5 показаны диаграммы скоростей невязкого квазитрехмерного потока на лопатках РК компрессора ТК18 после первичного проектирования. Диаграммы отвечают всем рекомендациям, применяемым при проектировании РК в научной школе ЛПИ-СПбПУ. Недостатком варианта РК после первичного проектирования является малая величина коэффициента теоретического напора. Согласно правилам первичного проектирования, коэффициент напора получился  $\psi_{\text{Трасч}} = 0,401$  вместо выбранного при вариантном расчете значения 0,435.

По согласованию с заказчиком для литого рабочего колеса компрессора ТК18 принята более простая форма средней линии — дуга окружности. В окончательном проекте рабочего колеса лопаточный аппарат РК обеспечивает  $\psi_{\text{Трасч}} = 0,468$  с запасом 7,5 % по отношению к значению, принятому

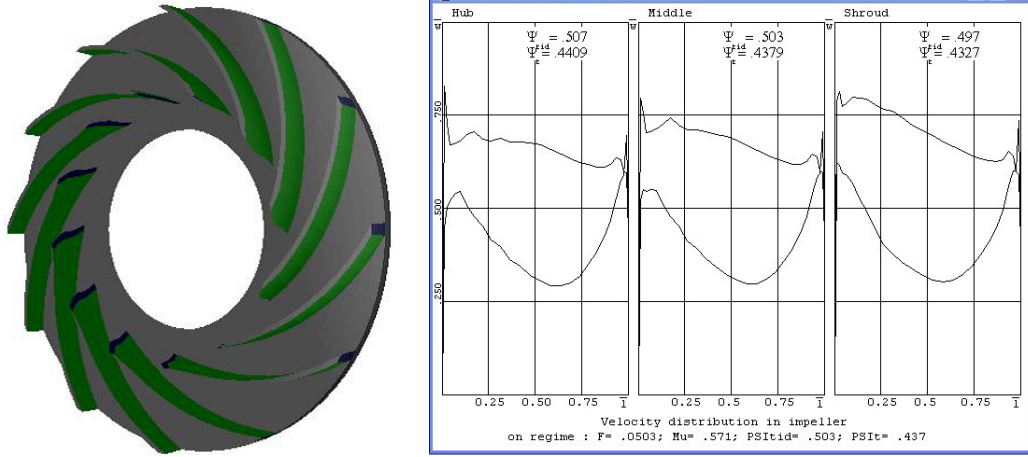


Рис. 6. Лопаточная решетка (слева) и диаграммы скоростей (справа) окончательного варианта РК ТК18  
 Fig. 6. Blade row (left) and velocity diagrams (right) of the final version of impeller TK18

при вариантном расчете. На рис. 6 показаны лопаточная решетка и диаграммы скоростей окончательного варианта РК ТК18.

Компрессор был изготовлен заказчиком и испытан. Проектные и экспериментальные характеристики компрессора ТК18 показаны на рис. 7. Результаты заводских «воздушных» испытаний компрессора ТК18 на стенде заказчика пересчитаны на проектные условия и показаны точками на рис. 7 сверху. В ноябре 2020 г. получены результаты испытания ТК18 на месте эксплуатации. На рис. 7 внизу показана безразмерная характеристика полезного напора.

### Заключение

Развитие современных вычислительных методов (CFD) и накопление результатов экспериментальных исследований позволило усовершенствовать математические модели Метода универсального моделирования в области расчета и проектирования центробежных компрессоров ТДА. Были уточнены математические модели различных уровней: от вариантного расчета до уточненного расчета газодинамических характеристик.

### Благодарности

Расчеты проводились с использованием суперкомпьютерного центра «Политехнический» СПбПУ.

### Список литературы

1. Галеркин Ю. Б., Данилов К. А., Попова Е. Ю. Численное моделирование центробежных компрессорных ступеней // Компрессорная техника и пневматика. 1993. Вып. 3. С. 11–20.
2. Галеркин Ю. Б., Попова Е. Ю., Данилов К. А. Численное моделирование центробежных компрессорных ступеней (физические основы, современное состояние) // Компрессорная техника и пневматика. 1993. Вып. 2. С. 1–9
3. Галеркин Ю. Б. Формирование взглядов па рабочие процессы и современное состояние газодинамических методов проектирования промышленных центробежных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2000. Вып. 2. С. 9–14.
4. Галеркин Ю. Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчёт и проектирование проточной части. Москва: КХТ, 2010. 596 с. ISBN 978-5-9902032-1-1.

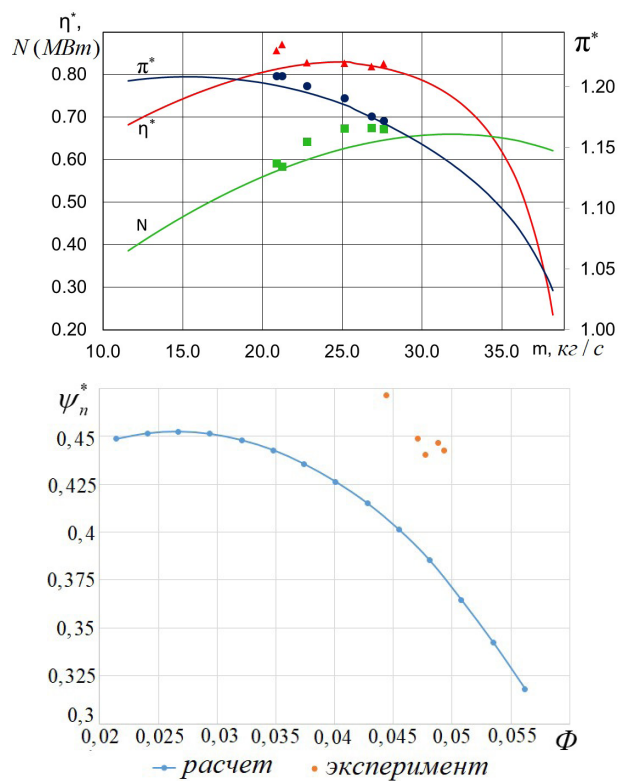


Рис. 7. Характеристика компрессора ТК18. Сверху — расчет по Методу универсального моделирования (сплошные линии) и результаты заводских испытаний (точки) [25]. Внизу — безразмерная напорная характеристика по проекту (сплошная линия) и точки испытания на месте эксплуатации  
 Fig. 7. Characteristics of the compressor TK18. Above — the calculation by the Universal Modelling Method (solid lines) and the results of factory tests (points) [18]. Below — dimensionless head characteristic according to the project (solid line) and test points at the site of operation

5. Васильев Ю. С., Родионов П. И., Соколовский М. И. Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения. Научные основы расчета, разработка методов оптимального проектирования и освоение производства // Промышленность России. 2000. № 10-11. С. 78–85.
6. Галиуллин З. Т., Сальников С. Ю., Щуровский В. А. Современные газотранспортные системы и технологии: моногр. Москва, 2014. 345 с.

7. Прокопов А. В., Кубанов А. Н., Истомин В. А. [и др.]. Современное состояние технологий промышленной подготовки газа газоконденсатных месторождений // Вести газовой науки. Научно-технический сборник. 2015. № 3 (23). С. 100–108.
8. Хетагуров В. А., Слугин П. П., Воронцов М. А. [и др.]. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промышленных технологических объектах газовой промышленности России // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). С. 14–22.
9. Семеновский В. Б. Особенности газодинамического проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов и создание базы данных модельных ступеней по результатам заводских испытаний: дис ... канд. техн. наук. Казань, 2020. 173 с.
10. Агрегат турбодетандерный производительностью 7–11 млн м<sup>3</sup>/сут. URL: <http://www.turbokholod.ru/content/c7-page1.html> (дата обращения: 16.10.2018).
11. Семеновский В. Б. Модельные ступени для центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. № 4. С. 11–23. DOI: 10.18721/JEST.24402.
12. Семеновский В. Б., Рекстин А. Ф., Галеркин Ю. Б., Соколов К. К. Экспериментальные и расчетные исследования серии центробежных компрессоров турбодетандерного агрегата // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 1 (706). С. 37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-37-47.
13. Rekstin A. F., Semenovskiy V. B., Galerkin Y. B., Sokolov A. A. The analysis of design and measured gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor within turboexpander aggregate // Oil and Gas Engineering (OGE-2018). AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030028-1–030028-11. DOI: 10.1063/1.5051889.
14. Галеркин Ю. Б., Соловьёва О. А. Совершенствование методов расчета безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней на основе вычислительных экспериментов. Часть 1 // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 3. С. 35–41.
15. Галеркин Ю. Б., Соловьёва О. А. Совершенствование методов расчета безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней на основе вычислительных экспериментов. Часть 2 // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 4. С. 15–21.
16. Соловьёва О. А., Галеркин Ю. Б. Выбор оптимальных соотношений размеров безлопаточного диффузора малорасходной центробежной компрессорной ступени // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 5. С. 11–15.
17. Соловьёва О. А., Галеркин Ю. Б. Расчетный анализ безлопаточного диффузора малорасходной центробежной компрессорной ступени // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 3. С. 10–13.
18. Соловьёва О. А. Математическая модель для расчета газодинамических характеристик и оптимизации безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 162 с.
19. Galerkin Y., Drozdov A., Rekstin A., Soldatova K. Methods of calculating loading factor characteristic of a centrifugal compressor impeller // Oil and Gas Engineering (OGE-2018). AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030037-1–030037-9. DOI: 10.1063/1.5051898.
20. Drozdov A., Galerkin Y. Modeling the non-incidence inlet flow rate coefficient in a centrifugal compressor impeller // Oil and Gas Engineering (OGE-2018). AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030052-1–030052-10. DOI: 10.1063/1.5051913.
21. Попова Е. Ю. Оптимизация основных параметров ступеней турбомашин на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1991. 275 с.
22. Рекстин А. Ф., Солдатова К. В., Галеркин Ю. Б. Верификация упрощенной математической модели центробежных компрессорных ступеней // Известия высших учебных заведений. 2018. № 9 (702). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-44-56.
23. Рекстин А. Ф. Научные основы и реализация метода первичного проектирования проточной части центробежных компрессоров: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. 342 с.
24. Бабиченко И. А., Михайлов А. А., Соколов К. К., Боровков А. И., Галеркин Ю. Б., Максименко И. А., Рекстин А. Ф., Семеновский В. Б., Ядыкин В. К. Опыт газодинамического проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов. CFD-анализ входного тракта // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 2. С. 5–22. DOI: 10.18721/JEST.27201.
25. Галеркин Ю. Б., Рекстин А. Ф., Солдатова К. В., Дроздов А. А., Соловьёва О. А., Семеновский В. Б. Современное состояние инженерного метода оптимального газодинамического проектирования и расчета характеристик центробежных компрессоров. Часть 3 // Компрессорная техника и пневматика. 2020. № 2. С. 2–9.

**ГАЛЕРКИН Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3559-7829

AuthorID (РИНЦ): 536512

ORCID-0000-0003-2657-6254

AuthorID (SCOPUS): 6602105885

Адрес для переписки: [yuri\\_galerkin@mail.ru](mailto:yuri_galerkin@mail.ru)

**РЕКСТИН Алексей Феликсович**, кандидат технических наук, ведущий специалист Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3870-8332

AuthorID (РИНЦ): 420297

ORCID: 0000-0001-5030-3091

AuthorID (SCOPUS): 556829596200

ResearcherID: K-5952-2014

Адрес для переписки: [rekstin2k7@mail.ru](mailto:rekstin2k7@mail.ru)

**СЕМЕНОВСКИЙ Василий Борисович**, кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 9646-6983

AuthorID (РИНЦ): 665896

ORCID: 0000-0002-7467-699X

AuthorID (SCOPUS): 57203589861

ResearcherID: S-5272-2018

Адрес для переписки: [swb534@mail.ru](mailto:swb534@mail.ru)

**МАРЕНИНА Любовь Николаевна**, кандидат технических наук, ассистент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код-5842-1771

AuthorID (РИНЦ): 791131

AuthorID (SCOPUS): 57188961410

ORCID: 0000-0001-9380-9754

ResearcherID: C-6788-2017

Адрес для переписки: [marenina\\_ln@mail.ru](mailto:marenina_ln@mail.ru)

**СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна**, кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4572-8002

AuthorID (РИНЦ): 703529

AuthorID (SCOPUS): 56829344800

ORCID: 0000-0001-5746-3071

ResearcherID: C-5456-2017

Адрес для переписки: [Solovyeva.OA@yandex.ru](mailto:Solovyeva.OA@yandex.ru)



**ДРОЗДОВ Александр Александрович**, доктор технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 6030-5685

AuthorID (РИНЦ): 314735

ORCID: 0000-0002-3808-7098

AuthorID (SCOPUS): 56649790100

Адрес для переписки: A\_drozdi@mail.ru

**РОЗАНОВ Леонид Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), главный инженер проекта Научно-исследовательской лаборатории «Газовая динамика турбомашин» ЦНТИ СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

AuthorID (РИНЦ): 239397

ORCID: 0000-0002-2227-6126

AuthorID (SCOPUS): 7003682406

Адрес для переписки: rozanov\_ln@spbstu.ru

**БРОДНЕВ Павел Николаевич**, кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетическо-

го машиностроения Института энергетики СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

AuthorID (РИНЦ): 280390

AuthorID (SCOPUS): 57220575266

Адрес для переписки: pbrodnev@mail.ru

#### Для цитирования

Галеркин Ю. Б., Рекстин А. Ф., Семеновский В. Б., Маренина Л. Н., Соловьёва О. А., Дроздов А. А., Розанов Л. Н., Броднев П. Н. Развитие подходов и опыт оптимального проектирования центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 9–20. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-9-20.

Статья поступила в редакцию 12.04.2022 г.

© Ю. Б. Галеркин, А. Ф. Рекстин, В. Б. Семеновский,  
Л. Н. Маренина, О. А. Соловьёва, А. А. Дроздов,  
Л. Н. Розанов, П. Н. Броднев

# CENTRIFUGAL COMPRESSORS OF TURBOEXPANDER UNITS: DEVELOPMENT OF APPROACHES AND EXPERIENCE OF OPTIMAL DESIGN

Yu. B. Galerkin, A. F. Rekstin, V. B. Semenovskiy, L. N. Marenina,  
O. A. Solovyeva, A. A. Drozdov, L. N. Rozanov, P. N. Brodnev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya str., 29, 195251

The process of designing a new turboexpander unit using the Universal modeling method consists of several stages: preliminary design, optimization, calculation of gas dynamic characteristics. The development of modern computational methods and the accumulation of experimental research results has allowed to improve mathematical models in the field of calculation and design of CC turbo-expander units. The resulting model includes 22 empirical coefficients, the calculation error is 1,8 %, which is sufficient for its practical application in project activities.

**Keywords:** centrifugal compressor, turboexpander unit, loading factor coefficient, mass flow coefficient, efficiency, mathematical model.

## Acknowledgments

The calculations are performed by supercomputer center SCC «Polytechnic», SPbPU.

## References

- Galerkin Yu. B., Danilov K. A., Popova E. Yu. Chislennoye modelirovaniye tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney [Numerical modeling of centrifugal compressor stages] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 1993. Issue 3. P. 11–20. (In Russ.).
- Galerkin Yu. B., Popova E. Yu., Danilov K. A. Chislennoye modelirovaniye tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney (fizicheskiye osnovy, sovremennoye sostoyaniye) [Numerical modeling of centrifugal compressor stages (physical foundations, current state)] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 1993. Issue 2. P. 1–9. (In Russ.).
- Galerkin Yu. B. Formirovaniye vzglyadov na rabochiye protsessy i sovremennoye sostoyaniye gazodinamicheskikh metodov proyektirovaniya promyshlennykh tsentrobezhnykh kompressorov [Formation of views on work processes and the current state of gas-dynamic methods for designing industrial centrifugal compressors] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2000. Issue 2. P. 9–14 (In Russ.).
- Galerkin Yu. B. Turbokompressor. Rabochiy protsess, raschat i proyektirovaniye protochnoy chasti [Turbochargers. Workflow, calculation and design of the flow path]. Moscow, 2010. 596 p. ISBN 978-5-9902032-1-1. (In Russ.).
- Vasil'yev Yu. S., Rodionov P. I., Sokolovskiy M. I. Vysokoeffektivnyye tsentrobezhnyye kompressory novogo pokoleniya. Nauchnyye osnovy rascheta, razrabotka metodov optimal'nogo proyektirovaniya i osvoyeniye proizvodstva [New generation high efficiency centrifugal compressors. Scientific calculations, development of methods for mastering and mastering production] // *Promyshlennost' Rossii. Promyshlennost' Rossii*. 2000. No. 10-11. P. 78-85. (In Russ.).
- Galiullin Z. T., Sal'nikov S. Yu., Shchurovskiy V. A. Sovremennyye gazotransportnyye sistemy i tekhnologii [Modern gas transmission systems and technologies]. Moscow, 2014. 345 p. (In Russ.).
- Prokopov A. V., Kubanov A.N., Istomin V. A. [et al.]. Sovremennoye sostoyaniye tekhnologiy promyslovoy podgotovki gaza gazokondensatnykh mestorozhdeniy [Modern state of technologies for field treatment of gas from gas condensate fields] // *Vesti gazovoy nauki. Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Vesti Gazovoy Nauki. Scientific-Technical Collection Book*. 2015. No. 3 (23). P. 100–108. (In Russ.).
- Khetagurov V. A., Slugin P. P., Vorontsov M. A. [et al.]. Opyt i perspektivy primeneniya turbodetandernykh agregatov na promyslovyykh tekhnologicheskikh ob'yektakh gazovoy promyshlennosti Rossii [Experience and prospects of application of turbo-expanders at the gas-field technological objects of gas industry in Russia] // *Gazovaya promyshlennost'. Gas Industry*. 2018. No. 11 (777). P. 14–22. (In Russ.).
- Semenovskiy V. B. Osobennosti gazodinamicheskogo proyektirovaniya tsentrobezhnykh kompressorov turbodetandernykh agregatov i sozdaniye bazy dannykh model'nykh stupeney po rezul'tatam zavodskikh ispytaniy [Features of gas-dynamic design of centrifugal compressors of turbo-expander units and creation of a database of model stages based on the results of factory tests]. Kazan, 2020. 173 p. (In Russ.).
- Agregat turbodetandernyy proizvoditel'nost'yu 7–11 mln mi/sut [Turbo expander unit with a capacity of 7–11 million mi/day]. URL: <http://www.turbokholod.ru/content/c7-page1.html> (accessed: 16.10.2018). (In Russ.).
- Semenovskiy V. B. Model'nyye stupeni dlya tsentrobezhnykh kompressorov turbodetandernykh agregatov [Centrifugal compressor model stages of turboexpander units] // *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. Nauchno-tekhnicheskkiye Vedomosti SPbPU. Estestvennyye i Inzhenernyye Nauki*. 2018. No. 4. P. 11–23. DOI: 10.18721/JEST.24402. (In Russ.).
- Semenovskiy V. B., Rekstin A. F., Galerkin Yu. B., Sokolov K. K. Eksperimental'nyye i raschetnyye issledovaniya serii tsentrobezhnykh kompressorov turbodetandernogo agregata [Experimental and calculation studies of a series of centrifugal compressors of a turboexpander unit] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal*

of *Mechanical Engineering*. 2019. No. 1 (706). P. 37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-1-37-47. (In Russ.).

13. Rekstin A. F., Semenovskiy V. B., Galerkin Y. B., Sokolov A. A. The analysis of design and measured gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor within turboexpander aggregate // *Oil and Gas Engineering (OGE-2018)*. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030028-1–030028-11. DOI: 10.1063/1.5051889. (In Engl.).

14. Galerkin Yu. B., Solov'yeva O. A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney na osnove vychislitel'nykh eksperimentov. Chast' 1 [Improvement of vaneless diffuser calculations based on CFD experiment. Part 1] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2014. No. 3. P. 35–41. (In Russ.).

15. Galerkin Yu. B., Solov'yeva O. A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney na osnove vychislitel'nykh eksperimentov. Chast' 2 [Improvement of vaneless diffuser calculations based on CFD experiment. Part 2] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2014. No. 4. P. 15–21. (In Russ.).

16. Solov'yeva O. A., Galerkin Yu. B. Vybora optimal'nykh sootnosheniy razmerov bezlopatochnogo diffuzora maloraskhodnoy tsentrobezhnoy kompressornoj stupeni [Selecting the dimensions of the vaneless diffuser of a centrifugal compressor stage at the primary design phase] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2017. No. 5. P. 11–15. (In Russ.).

17. Solov'yeva O. A., Galerkin Yu. B. Raschetnyy analiz bezlopatochnogo diffuzora maloraskhodnoy tsentrobezhnoy kompressornoj stupeni [Low flow rate centrifugal compressor stage vaneless diffuser analysis] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2017. No. 3. P. 10–13. (In Russ.).

18. Solov'yeva O. A. Matematicheskaya model' dlya rascheta gazodinamicheskikh kharakteristik i optimizatsii bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney [Mathematical model for calculation of gas-dynamic characteristics and optimization of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages]. St. Petersburg, 2018. 162 p. (In Russ.).

19. Galerkin Y., Drozdov A., Rekstin A., Soldatova K. Methods of calculating loading factor characteristic of a centrifugal compressor impeller // *Oil and Gas Engineering (OGE-2018)*. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030037-1–030037-9. DOI: 10.1063/1.5051898. (In Engl.).

20. Drozdov A., Galerkin Y. Modeling the non-incidence inlet flow rate coefficient in a centrifugal compressor impeller // *Oil and Gas Engineering (OGE-2018)*. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. P. 030052-1–030052-10. DOI: 10.1063/1.5051913. (In Engl.).

21. Popova E. Yu. Optimizatsiya osnovnykh parametrov stupeney turbomashin na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Optimization of the main parameters of turbomachine stages based on mathematical modeling]. St. Petersburg, 1991. 275 p. (In Russ.).

22. Rekstin A. F., Soldatova K. V., Galerkin Yu. B. Verifikatsiya uproschennoy matematicheskoy modeli tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney [The verification of a simplified mathematical model of the centrifugal compressor stages] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018. No. 9 (702). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-44-56. (In Russ.).

23. Rekstin A. F. Nauchnyye osnovy i realizatsiya metoda pervichnogo proyektirovaniya protochnoy chasti tsentrobezhnykh kompressorov [Scientific foundations and implementation of the method of primary design of the flow path of centrifugal compressors]. St. Petersburg, 2021. 342 p. (In Russ.).

24. Babichenko I. A., Mikhaylov A. A., Sokolov K. K., Borovkov A. I., Galerkin Yu. B., Maksimenko I. A., Rekstin A. F.,

Semenovskiy V. B., Yadykin V. K. Opyt gazodinamicheskogo proyektirovaniya tsentrobezhnykh kompressorov turbodetandernykh agregatov. CFD-analiz vkhodnogo trakta [Experience in gas dynamic design of turboexpander centrifugal compressors. inlet tract CFD analysis] // *Materialovedeniye. Energetika. Materials Science. Power Engineering*. 2021. Vol. 27, no. 2. P. 5–22. DOI: 10.18721/JEST.27201. (In Russ.).

25. Galerkin Yu. B., Rekstin A. F., Soldatova K. V., Drozdov A. A., Solov'yeva O. A., Semenovskiy V. B. Sovremennoye sostoyaniye inzhenernogo metoda optimal'nogo gazodinamicheskogo proyektirovaniya i rascheta kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov. Chast' 3 [Design of centrifugal compressors by means of a universal modelling method] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2020. No. 2. P. 2–9. (In Russ.).

**GALERKIN Yuriy Borisovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Higher School of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg.

SPIN-code: 3559-7829

AuthorID (RSCI): 536512

ORCID-0000-0003-2657-6254

AuthorID (SCOPUS): 6602105885

Correspondence address: yuri\_galerkin@mail.ru

**REKSTIN Aleksey Feliksovich**, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3870-8332

AuthorID (RSCI): 420297

ORCID: 0000-0001-5030-3091

AuthorID (SCOPUS): 556829596200

ResearcherID: K-5952-2014

Correspondence address: rekstin2k7@mail.ru

**SEMENOVSKIY Vasilii Borisovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 9646-6983

AuthorID (RSCI): 665896

ORCID: 0000-0002-7467-699X

AuthorID (SCOPUS): 57203589861

ResearcherID: S-5272-2018

Correspondence address: swb534@mail.ru

**MARENINA Lyubov Nikolayevna**, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code-5842-1771

AuthorID (RSCI): 791131

AuthorID (SCOPUS): 57188961410

ORCID: 0000-0001-9380-9754

ResearcherID: C-6788-2017

Correspondence address: marenina\_ln@mail.ru

**SOLOVYEVA Olga Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 4572-8002

AuthorID (RSCI): 703529

AuthorID (SCOPUS): 56829344800

ORCID: 0000-0001-5746-3071

ResearcherID: C-5456-2017

Correspondence address: Solovyeva.OA@yandex.ru

**DROZDOV Aleksandr Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.



SPIN-code: 6030-5685

AuthorID (RSCI): 314735

ORCID: 0000-0002-3808-7098

AuthorID (SCOPUS): 56649790100

Correspondence address: A\_drozdi@mail.ru

**ROZANOV Leonid Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Engineer of the project «Gas Dynamics of Turbomachines», Research Laboratory, SPbPU, Saint Petersburg.

AuthorID (RSCI): 239397

ORCID: 0000-0002-2227-6126

AuthorID (SCOPUS): 7003682406

Correspondence address: rozanov\_ln@spbstu.ru

**BRODNEV Pavel Nikolayevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

AuthorID (RSCI): 280390

AuthorID (SCOPUS): 57220575266.

Correspondence address: pbrodnev@mail.ru

#### For citations

Galerkin Yu. B., Rekstin A. F., Semenovskiy V. B., Marenina L. N., Solovyeva O. A., Drozdov A. A., Rozanov L. N., Brodnev P. N. Centrifugal compressors of turboexpander units: development of approaches and experience of optimal design // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 9–20. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-9-20.

Received April 12, 2022.

© Yu. B. Galerkin, A. F. Rekstin, V. B. Semenovskiy,  
L. N. Marenina, O. A. Solovyeva, A. A. Drozdov,  
L. N. Rozanov, P. N. Brodnev