

УДК 621.512

Разработка методики ускоренной оценки относительного выигрыша в подводимой в процессе сжатия технической работе и показателя политропы конечных параметров в поршневом компрессоре с двухфазным рабочим телом

В.Е. Щерба¹, А.К. Кужбанов¹, М.И. Гильдебрандт¹,
В.Ю. Куденцов¹, Н.С. Галдин², А.А. Гладенко¹

¹ Омский государственный технический университет

² Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Development of a method for accelerated assessment of the relative gain in the input technical work in the compression process and the polytropic index of the final parameters in a piston compressor with a two-phase working fluid

V.E. Shcherba¹, A.K. Kuzhbanov¹, M.I. Gildebrandt¹,
V.Yu. Kudentsov¹, N.S. Galdin², A.A. Gladenko¹

¹ Omsk State Technical University

² Siberian State Automobile and Highway University

Предложена методика определения относительного выигрыша в подводимой при сжатии технической работе и показателя политропы конечных параметров процесса сжатия двухфазного рабочего тела упрощенным методом на основе интерполяционных полиномов, построенных для многомерного пространства, которое определяется основными независимыми переменными, оказывающими наибольшее влияние на целевые функции: относительное количество и средний радиус капель впрыскиваемой жидкости, давление нагнетания и число оборотов коленчатого вала. Построенные регрессионные полиномы первого и второго порядка достаточно хорошо описывают изменение целевых функций от независимых переменных. Для полинома первого порядка среднее квадратичное отклонение составило 2,0...2,6 %, для полинома второго порядка — около 1,0 %. Полученные полиномы можно использовать как в исследовательских целях, так и на практике.

EDN: YAHDKA, <https://elibrary/yahdka>

Ключевые слова: поршневой компрессор, впрыск охлаждающей жидкости, выигрыш в технической работе, показатель политропы процесса сжатия, интерполяционные полиномы

The paper proposes a method in determining a relative gain in the technical work supplied during the compression process and the polytropic index of the final parameters of the two-

phase working fluid compression process using a simplified method based on applying the interpolation polynomials constructed for the multidimensional space. It is determined by the main independent variables that are significantly influencing the objective functions: relative number and average radius of the injected liquid droplets, injection pressure and the crankshaft speed. The constructed regression polynomials of the first and second order are describing alteration in the objective functions quite well depending on the independent variables. For the first-order polynomial, standard deviation is 2.0 ... 2.6 %, for the second-order polynomial — 1.0 %. The obtained polynomials could be used in both the research purposes and practice.

EDN: YAHDKA, <https://elibrary/yahdka>

Keywords: piston compressor, coolant injection, technical operation gain, compression polytropic index, interpolation polynomials

Широко применяемый во многих отраслях экономики сжатый воздух [1, 2] вырабатывают, как правило, компрессоры объемного действия (поршневые, винтовые, ротационные и т. д.). Поэтому задача повышения их эффективности остается актуальной на протяжении многих лет.

Исследования поршневых компрессоров (ПК) [2, 3] позволили установить, что основным путем повышения их эффективности и экономичности является улучшение охлаждения компримируемого газа (КГ) в процессе сжатия. Для отвода теплоты в процессе сжатия применяют рекуперативный [2, 3], регенеративный [4–6] и смешительный [7, 8] способы. Среди них последний отличается наибольшей эффективностью вследствие получения развитой поверхности теплообмена и отсутствия термического сопротивления. Такой вид теплообмена требуется многим компрессорам объемного действия, в частности маслозаполненным винтовым и водокольцевым [9, 10].

К главным задачам проектирования и эксплуатации компрессоров объемного действия со впрыском охлаждающей жидкости (ОЖ) относится определение выигрыша в технической работе, подводимой в процессе сжатия. Также исследователей интересует показатель политропы процесса сжатия, так как с его помощью можно определить температуру КГ в процессе сжатия и подводимую индикаторную техническую работу.

Теория рабочих процессов ПК со впрыском ОЖ изучена достаточно хорошо [7, 8]. Существуют математические модели, позволяющие рассчитывать процесс сжатия в ПК как при наличии фазовых переходов первого рода, так и при их отсутствии.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования позволили уста-

новить, что для подавляющего большинства жидкостей, используемых в диспергированном виде при сжатии газов, фазовыми переходами первого рода можно пренебречь. К этим жидкостям можно отнести воду [11, 12], минеральные и синтетические масла [7, 8], жидкости на кремнийорганической основе и современные ионные жидкости [13], используемые в водородных компрессорах при компримировании.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть для определения выигрыша в подводимой при сжатии технической работе и, соответственно, показателя политропы конечных параметров математическую модель процесса сжатия при отсутствии фазовых переходов первого рода. Используя современные методы планирования численного эксперимента и математическую модель процесса сжатия с двухфазным рабочим телом при отсутствии фазовых переходов первого рода, можно получить многомерные полиномы указанных целевых функций от основных независимых параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффективность процесса сжатия или построить нейронную сеть, связывающую независимые параметры и целевые функции. В этом случае исследователь или экспериментатор может легко определить значения целевых функций, не решая системы дифференциальных уравнений, которая описывает изменения термодинамических параметров в процессе сжатия.

Цель работы — облегчить исследователю получение информации по относительному выигрышу в работе и показателю политропы процесса сжатия в ПК при использовании впрыска жидкости.

Теоретическая часть. Для расчета рабочих процессов компрессоров объемного действия

разработаны различные математические модели. Согласно классификации [2], все математические модели рабочих процессов ПК можно подразделить на три группы: основанные на политропном приближении, с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Математические модели с сосредоточенными параметрами, основанными на методе VOF [13], с использованием различных моделей турбулентности широко применяют для исследования рабочих процессов водородных ПК с жидкостным поршнем из ионной жидкости. Такие модели позволяют определить объемное содержание газа и жидкости в каждой точке пространства, а значит, получить распределение жидкости по объему рабочей камеры. К недостаткам этих моделей следует отнести высокую математическую сложность, значительное время реализации и трудность в написании программного кода.

Математические модели, основанные на политропном приближении, просты и удобны в реализации, однако слабо отражают протекающие физические процессы и имеют математические трудности в определении показателя политропы [2]. Такие модели обеспечивают результаты с достаточной степенью точности для практики, просты в реализации и требуют мало времени для получения конечного результата. Эти факторы обуславливают применение математической модели с сосредоточенными параметрами для расчета процесса сжатия и определения относительного выигрыша в подводимой технической работе и показателя политропы по начальным и конечным параметрам в функции от основных независимых переменных.

Анализ работ по расчету процесса сжатия с двухфазным рабочим телом при отсутствии фазовых переходов первого рода позволил установить, что для получения результатов с достаточной степенью точности можно использовать следующие допущения:

- ОЖ находится в рабочей полости в виде сферических неподвижных капель, равномерно распределенных по объему;
- все капли ОЖ имеют одинаковый размер;
- градиент изменения температуры внутри капли пренебрежимо мал;
- деформация капель под действием температуры и давления отсутствует;
- теплофизические свойства рабочего тела остаются постоянными в процессе сжатия;

- внешний теплообмен между КГ и поверхностями стенок рабочей камеры пренебрежимо мал;

- массы КГ и ОЖ в процессе сжатия остаются постоянными (утечки и притечки через неплотности рабочей камеры отсутствуют);

- сжимаемый газ подчиняется законам идеального газа;

- объем ОЖ пренебрежимо мал.

В основу математической модели с сосредоточенными параметрами положены уравнение сохранения энергии для газовой фазы (в виде первого закона термодинамики), уравнение сохранения энергии для жидкостной фазы, уравнение состояния идеального газа и уравнение изменения объема рабочей полости. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} dU_r = dQ - pdV_r; \\ dT_w = \frac{-dQ}{M_w C_w}; \\ p = (k-1)U_r/V_r; \\ T_r = pV_r/M_r R; \\ V_r = \frac{V_h}{2} \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda_r}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \end{cases}$$

где U_r и dU_r — полная внутренняя энергия КГ в рабочей камере и ее элементарное изменение, $dU_r = C_v M_r dT_r$ (C_v — удельная массовая изохорная теплоемкость КГ; M_r , T_r и V_r — масса, температура и объем КГ); dQ — элементарный внешний теплообмен между КГ и ОЖ; p — давление КГ; T_w , M_w и C_w — температура, масса и удельная массовая изобарная теплоемкость ОЖ; k — показатель адиабаты КГ; R — газовая постоянная; V_h — рабочий объем камеры сжатия, $V_h = (\pi d^2/4)S_h$ (d и S_h — диаметр поршня и его полный ход); φ — текущий угол поворота коленчатого вала; λ_r — отношение полного хода поршня к удвоенной длине шатуна.

Элементарное изменение объема рабочей полости

$$dV = F_n \frac{S_h}{2} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_r}{2} \sin 2\varphi \right) \omega d\tau,$$

где F_n — площадь поршня; ω — угловая скорость коленчатого вала; $d\tau$ — элементарный промежуток времени, $d\tau = d\varphi/\omega$.

Согласно гипотезе Ньютона — Рихмана, элементарный внешний теплообмен определяется выражением

$$dQ = \alpha F (T_w - T) d\tau.$$

Коэффициент теплоотдачи между каплями ОЖ и КГ при наличии относительного движения в общем случае определяется по уравнению Фреслинга [7], которое с учетом принятых допущений принимает вид

$$Nu = 2$$

и, соответственно,

$$\alpha = \lambda / r_k,$$

где Nu — число Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности газа; r_k — средний радиус капель ОЖ.

Площадь полной поверхности теплообмена

$$F = \frac{3G_w}{\rho_w r_k},$$

где G_w — количество ОЖ в рабочей камере; ρ_w — плотность ОЖ.

Относительный выигрыш в технической работе, подводимой в процессе сжатия, вычисляется как

$$\bar{A}_{сж} = \frac{A_{ад,сж} - A_{сж}}{A_{сж}}.$$

Здесь $A_{сж}$ — техническая работа, подводимая в процессе сжатия с двухфазным рабочим телом,

$$A_{сж} = \int_{p_{вс}}^{p_H} V dp$$

($p_{вс}$ и p_H — давление всасывания и нагнетания КГ); $A_{ад,сж}$ — техническая работа, подводимая при адиабатическом сжатии,

$$A_{ад,сж} = \frac{k}{k-1} MRT_{вс} \left[\left(\frac{p_H}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

где M — масса газа в рабочей полости; $T_{вс}$ — температура всасываемого газа.

Показатель политропы процесса сжатия конечных параметров

$$n_{сж} = \frac{\ln(p_H/p_{вс})}{\ln(V_{вс}/V_{сж})},$$

где $V_{вс}$ и $V_{сж}$ — объемы рабочей полости в конце процесса всасывания и сжатия.

Тогда подводимая в процессе сжатия техническая работа с достаточной точностью определяется как

$$A_{сж} = \frac{n_{сж}}{n_{сж}-1} MRT_{вс} \left[\left(\frac{p_H}{p_{вс}} \right)^{\frac{n_{сж}-1}{n_{сж}}} - 1 \right].$$

Планирование численного эксперимента. Точность нейронной сети и других методов интерполяции данных зависит от качества исходных данных, по которым выполняют обучение нейронной сети или выбор коэффициентов интерполяционной функции.

Существует несколько подходов к формированию выборки значений входных факторов для обучения нейронной сети. Например, в работах [14, 15] предложено использовать методы детерминированного факторного эксперимента. Однако такой подход хорошо зарекомендовал себя только при решении линейных проблем, таких как механика твердого деформируемого тела.

Чтобы повысить точность нейронной сети, предложено дополнить детерминированный набор значений факторов несколькими случайными значениями в пределах области их определения [14, 15]. Однако в этом случае отсутствует гарантия того, что выбранные случайные значения факторов не окажутся в малозначимых областях интерполируемой зависимости, а область ее важных особенностей окажется непокрытой факторами.

Еще один подход заключается в формировании полностью случайной выборки значений факторов. При этом обеспечение статистической значимости требует большого размера выборки, что приводит к значительным затратам на проведение численных или натурных экспериментов. Это делает такой подход малоэффективным или даже невозможным. Для преодоления указанных проблем предложен метод латинского гиперкуба (МЛГ) [16].

Чтобы повысить заполняемость поля значений факторов, МЛГ предлагает разбить область определения факторов на равновероятные интервалы [17, 18], для чего необходимо знать функцию плотности вероятности каждого из факторов. В рассматриваемой задаче все значения факторов являются равновероятными.

Анализ рабочих процессов, происходящих в компрессоре объемного действия с двухфазным рабочим телом, показал, что можно выделить четыре независимых параметра, оказывающих наибольшее влияние на его работу: давление нагнетания КГ $x_1(p_H)$, число оборотов коленчатого вала $x_4(n_{об})$, относительное количество впрыскиваемой жидкости $x_3(d_{впр})$ и средний радиус капель ОЖ $x_2(r_k)$. В качестве целевых функций выбраны относительный выигрыш в подводимой в процессе сжатия технической

работе $y_1(\bar{A}_{сж})$ и показатель политропы процесса сжатия $y_2(n_{сж})$.

Объектом исследования выступал ПК, имеющий следующие основные конструктивные и эксплуатационные характеристики: диаметр поршня — 0,04 м; полный ход поршня — 0,045 м; отношение полного хода поршня к удвоенной длине шатуна — 0,2; объем относительного мертвого пространства — 0; давление всасывания — 0,1 МПа; температура всасываемого газа — 293 К; температура впрыскиваемой жидкости — 293 К.

Анализ литературы и результатов экспериментальных и теоретических исследований [1–3] позволил установить следующие диапазоны изменения основных независимых параметров:

- давление нагнетания КГ — 0,3...1,0 МПа;
- число оборотов коленчатого вала — 500...1500 об/мин;
- относительное количество впрыскиваемой ОЖ — 1...10 кг/кг;
- средний радиус капель ОЖ — 10...100 мкм.

С учетом изложенного разбиваем всю область определения независимых переменных на равные по длине отрезки. Исходя из ограничений на вычислительные затраты, выбираем следующие интервалы для факторов:

$$x_1 = \{ [1, 4], [4, 7], [7, 10] \};$$

$$x_2 = \{ [10, 40], [40, 70], [70, 100] \}, \text{ мкм};$$

$$x_3 = \{ [0,3; 0,5], [0,5; 0,8], [0,8; 1,0] \}, \text{ МПа};$$

$$x_4 = \{ [500, 1000], [1000, 1500] \}, \text{ об/мин}.$$

На следующем этапе МЛГ [17, 18] перебираются все возможные сочетания интервалов факторов. С учетом того, что для факторов x_1 , x_2 и x_3 выбраны три интервала, а для фактора x_4 — два, общее количество сочетаний интервалов $N = 3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$. Далее для каждого из сочетаний интервалов случайным образом выбираются конкретные значения факторов в пределах заданных узких диапазонов. Это обеспечивает случайность выборки и гарантирует покрытие всего поля определения факторов.

В связи с тем, что все возможные значения факторов являются равновероятными, использован стандартный генератор случайных величин `random.uniform()`, входящий в состав языка Python.

Случайные значения факторов приведены в табл. 1, где квадратными скобками обозначен интервал значений независимой переменной, а под ними — случайное значение этого фактора в пределах указанного интервала.

Результаты исследований. Значения функций отклика для всех численных опытов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Случайные значения факторов

Номер опыта	x_1	x_2 , мкм	x_3 , МПа	x_4 , об/мин
1	[1; 4] 3,61566657	[10; 40] 33,25062128	[0,3; 0,5] 0,40113966	[500; 1000] 623,63472803
2	[1; 4] 3,24906537	[10; 40] 14,46636755	[0,3; 0,5] 0,49415438	[1000; 1500] 1193,43710646
3	[1; 4] 2,21846252	[10; 40] 14,08032448	[0,5; 0,8] 0,77694303	[500; 1000] 890,48326525
4	[1; 4] 3,79512143	[10; 40] 23,21762013	[0,5; 0,8] 0,75334717	[1000; 1500] 1391,45289221
5	[1; 4] 3,21022388	[10; 40] 19,45581812	[0,8; 1,0] 0,85961193	[500; 1000] 857,57572719
6	[1; 4] 2,53812654	[10; 40] 29,88769608	[0,8; 1,0] 0,84883694	[1000; 1500] 1290,51745626
7	[1; 4] 1,38815135	[40; 70] 44,43182101	[0,3; 0,5] 0,34679913	[500; 1000] 637,35141433
8	[1; 4] 2,16819058	[40; 70] 48,47371688	[0,3; 0,5] 0,32886819	[1000; 1500] 1196,22251583
9	[1; 4] 2,7885906	[40; 70] 47,10123574	[0,5; 0,8] 0,55438118	[500; 1000] 705,45839319

Продолжение табл. 1

Номер опыта	x_1	x_2 , мкм	x_3 , МПа	x_4 , об/мин
10	[1; 4] 3,56066641	[40; 70] 43,05809408	[0,5; 0,8] 0,53016893	[1000; 1500] 1214,01620459
11	[1; 4] 1,48793006	[40; 70] 49,41784227	[0,8; 1,0] 0,82262076	[500; 1000] 512,0113544
12	[1; 4] 1,78667482	[40; 70] 64,47358248	[0,8; 1,0] 0,93973382	[1000; 1500] 1026,08091561
13	[1; 4] 3,7532642	[70; 100] 87,39296378	[0,3; 0,5] 0,3617958	[500; 1000] 601,9790356
14	[1; 4] 2,62976886	[70; 100] 74,32896697	[0,3; 0,5] 0,37549374	[1000; 1500] 1174,75700487
15	[1; 4] 3,85131669	[70; 100] 82,74361278	[0,5; 0,8] 0,78822065	[500; 1000] 871,85102051
16	[1; 4] 2,50666917	[70; 100] 86,09789785	[0,5; 0,8] 0,71302262	[1000; 1500] 1175,06618839
17	[1; 4] 2,02981113	[70; 100] 80,31602304	[0,8; 1,0] 0,97523582	[500; 1000] 969,86015161
18	[1; 4] 3,70183172	[70; 100] 84,53664375	[0,8; 1,0] 0,94297899	[1000; 1500] 1259,66355908
19	[4; 7] 5,83698957	[10; 40] 27,67517855	[0,3; 0,5] 0,37124786	[500; 1000] 655,75302084
20	[4; 7] 5,10324989	[10; 40] 24,9767367	[0,3; 0,5] 0,31303127	[1000; 1500] 1132,64762034
21	[4; 7] 5,35911092	[10; 40] 15,45311596	[0,5; 0,8] 0,58998714	[500; 1000] 831,03478372
22	[4; 7] 4,64936744	[10; 40] 21,8816369	[0,5; 0,8] 0,69197563	[1000; 1500] 1405,4272367
23	[4; 7] 6,10813197	[10; 40] 32,21616167	[0,8; 1,0] 0,94233248	[500; 1000] 663,35270786
24	[4; 7] 5,13047525	[10; 40] 22,29893173	[0,8; 1,0] 0,83530692	[1000; 1500] 1269,16348318
25	[4; 7] 6,07582431	[40; 70] 54,01826823	[0,3; 0,5] 0,4592404	[500; 1000] 759,02765234
26	[4; 7] 4,15730695	[40; 70] 49,10852604	[0,3; 0,5] 0,35021729	[1000; 1500] 1111,91796648
27	[4; 7] 4,14447638	[40; 70] 63,92822729	[0,5; 0,8] 0,79025981	[500; 1000] 565,32171932
28	[4; 7] 6,24814646	[40; 70] 64,8802981	[0,5; 0,8] 0,74994077	[1000; 1500] 1171,54166596
29	[4; 7] 6,44570425	[40; 70] 55,37174916	[0,8; 1,0] 0,89242236	[500; 1000] 734,70934809
30	[4; 7] 5,47769551	[40; 70] 55,60561168	[0,8; 1,0] 0,94090953	[1000; 1500] 1390,56366508
31	[4; 7] 5,4294412	[70; 100] 87,91700407	[0,3; 0,5] 0,3967845	[500; 1000] 784,30182008
32	[4; 7] 4,76003572	[70; 100] 74,83641467	[0,3; 0,5] 0,4008562	[1000; 1500] 1102,31014332

Окончание табл. 1

Номер опыта	x_1	x_2 , мкм	x_3 , МПа	x_4 , об/мин
33	[4; 7] 5,15158014	[70; 100] 97,43972837	[0,5; 0,8] 0,7666706	[500; 1000] 826,29209832
34	[4; 7] 6,16382204	[70; 100] 98,60364682	[0,5; 0,8] 0,7358763	[1000; 1500] 1208,34942426
35	[4; 7] 4,63826972	[70; 100] 75,42659185	[0,8; 1,0] 0,84488621	[500; 1000] 950,53817803
36	[4; 7] 5,55725359	[70; 100] 95,90648125	[0,8; 1,0] 0,91467173	[1000; 1500] 1395,66270845
37	[7; 10] 7,47707707	[10; 40] 19,05058875	[0,3; 0,5] 0,41836985	[500; 1000] 962,31351306
38	[7; 10] 8,3133841	[10; 40] 35,50934577	[0,3; 0,5] 0,47387906	[1000; 1500] 1279,887635
39	[7; 10] 9,53594193	[10; 40] 29,75544485	[0,5; 0,8] 0,62073299	[500; 1000] 976,37706464
40	[7; 10] 9,16498233	[10; 40] 16,58994421	[0,5; 0,8] 0,58345327	[1000; 1500] 1013,62597906
41	[7; 10] 7,59153117	[10; 40] 17,98848861	[0,8; 1,0] 0,92240323	[500; 1000] 606,87242086
42	[7; 10] 7,29417696	[10; 40] 15,3573701	[0,8; 1,0] 0,82141965	[1000; 1500] 1032,62171713
43	[7; 10] 7,49337339	[40; 70] 68,80601182	[0,3; 0,5] 0,42377129	[500; 1000] 779,54538995
44	[7; 10] 9,60592021	[40; 70] 45,77132408	[0,3; 0,5] 0,48379994	[1000; 1500] 1374,1119108
45	[7; 10] 7,95766128	[40; 70] 41,19337192	[0,5; 0,8] 0,64203436	[500; 1000] 555,72063058
46	[7; 10] 7,47819689	[40; 70] 50,82856992	[0,5; 0,8] 0,58189347	[1000; 1500] 1278,52426257
47	[7; 10] 8,20072099	[40; 70] 48,6379151	[0,8; 1,0] 0,9716381	[500; 1000] 563,72043527
48	[7; 10] 7,24322223	[40; 70] 55,37760844	[0,8; 1,0] 0,97698126	[1000; 1500] 1041,96917734
49	[7; 10] 7,23161859	[70; 100] 98,2991065	[0,3; 0,5] 0,48562128	[500; 1000] 631,79524155
50	[7; 10] 7,18110091	[70; 100] 74,51869779	[0,3; 0,5] 0,46390084	[1000; 1500] 1013,36312802
51	[7; 10] 9,30205736	[70; 100] 74,74485912	[0,5; 0,8] 0,71181818	[500; 1000] 529,81877478
52	[7; 10] 8,05780616	[70; 100] 83,35415631	[0,5; 0,8] 0,58116882	[1000; 1500] 1341,07109489
53	[7; 10] 7,75698363	[70; 100] 87,77059916	[0,8; 1,0] 0,8351364	[500; 1000] 571,87898235
54	[7; 10] 7,81308611	[70; 100] 98,43508717	[0,8; 1,0] 0,81771657	[1000; 1500] 1000,91605049

Таблица 2

Значения функций отклика

Номер опыта	y_1	y_2	Номер опыта	y_1	y_2	Номер опыта	y_1	y_2
1	0,1600	1,0932	19	0,1755	1,0470	37	0,2127	1,0290
2	0,2270	1,0510	20	0,1427	1,0680	38	0,1894	1,0830
3	0,2937	1,0602	21	0,2800	1,0285	39	0,2660	1,0460
4	0,2450	1,0914	22	0,2620	1,0716	40	0,2865	1,0210
5	0,3140	1,0615	23	0,3178	1,0580	41	0,3836	1,0210
6	0,1851	1,1610	24	0,2907	1,0632	42	0,3790	1,0246
7	0,0610	1,2370	25	0,1452	1,1340	43	0,1110	1,1639
8	0,0450	1,2700	26	0,0770	1,1960	44	0,1680	1,1150
9	0,1265	1,1810	27	0,1680	1,1650	45	0,2556	1,0570
10	0,1115	1,1920	28	0,1231	1,2160	46	0,1547	1,1520
11	0,1230	1,2250	29	0,2277	1,1290	47	0,3020	1,0740
12	0,0588	1,3140	30	0,1440	1,2100	48	0,2080	1,1510
13	0,0511	1,2625	31	0,0590	1,2520	49	0,0890	1,2190
14	0,0295	1,3190	32	0,0530	1,2660	50	0,0930	1,2124
15	0,0776	1,2800	33	0,0788	1,2780	51	0,2030	1,1210
16	0,0347	1,3372	34	0,0618	1,2960	52	0,0780	1,2510
17	0,0450	1,3340	35	0,1030	1,2529	53	0,1710	1,1770
18	0,0582	1,3150	36	0,0613	1,3110	54	0,0924	1,2570

Для построения интерполяционных полиномов обезразмерим независимые переменные следующим образом:

$$x_{1\max} = 10; \tilde{x}_1 = \frac{x_1}{x_{1\max}};$$

$$x_{2\max} = 100 \text{ мкм}; \tilde{x}_2 = \frac{x_2}{x_{2\max}};$$

$$x_{3\max} = 1 \text{ МПа}; \tilde{x}_3 = \frac{x_3}{x_{3\max}};$$

$$x_{4\max} = 1500 \text{ мин}^{-1}; \tilde{x}_4 = \frac{x_4}{x_{4\max}}.$$

Используя метод наименьших квадратов, построим регрессионные полиномы для функций отклика y_1 и y_2 . Принимая во внимание, что линейные полиномы являются наиболее удобными для практического пользования, а полиномы более высоких порядков позволяют получить более точные результаты (в плане уменьшения среднеквадратичного отклонения), проведем интерполяцию полученных результатов с помощью полинома первого порядка (линейного) и второго порядка (квадратичного).

На рис. 1, а приведены результаты интерполяции функции отклика y_1 полиномом первого порядка

$$y_1 = a_0 + a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 + a_{13}\tilde{x}_3 + a_{14}\tilde{x}_4,$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,18132456632838442; \\ a_{11} &= 0,15454817197554868; \\ a_{12} &= -0,28879134241342075; \\ a_{13} &= 0,17481365998200354; \\ a_{14} &= -0,099844715250027. \end{aligned}$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\Delta y_1 = 0,026278468411214593.$$

На рис. 1, б приведены результаты интерполяции функции отклика y_1 полиномом второго порядка

$$\begin{aligned} y_1 &= a_0 + a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 + a_{13}\tilde{x}_3 + a_{14}\tilde{x}_4 + a_{21}\tilde{x}_1^2 + \\ &+ a_{22}\tilde{x}_2^2 + a_{23}\tilde{x}_3^2 + a_{24}\tilde{x}_4^2 + b_{12}\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + b_{13}\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + \\ &+ b_{14}\tilde{x}_1\tilde{x}_4 + b_{23}\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + b_{24}\tilde{x}_2\tilde{x}_4 + b_{34}\tilde{x}_3\tilde{x}_4, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,05588575836133014; \\ a_{11} &= 0,977911576022016; \end{aligned}$$

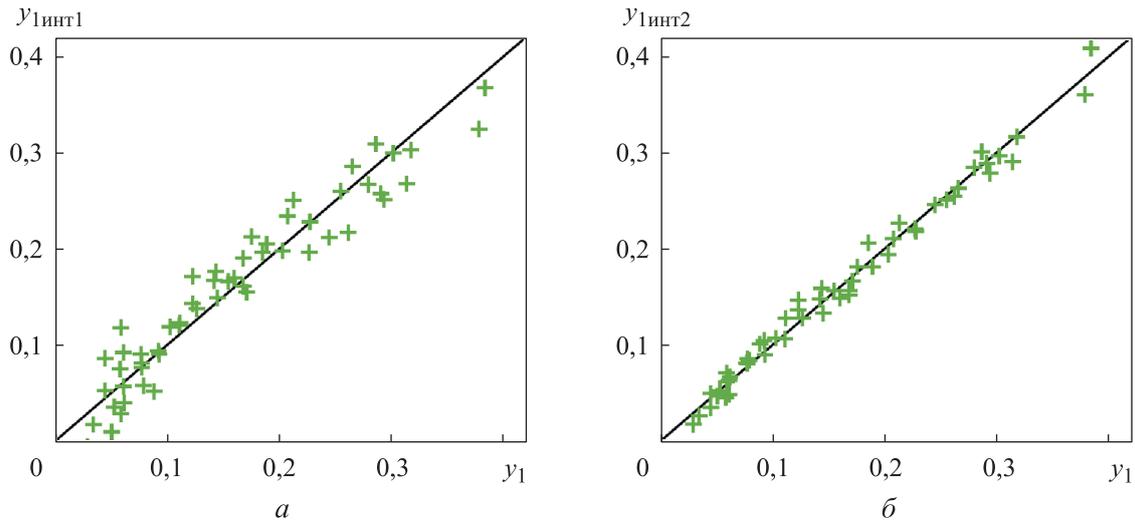


Рис. 1. Результаты интерполяции функции y_1 полиномами первого $y_{1инт1}$ (а) и второго $y_{1инт2}$ (б) порядков

$$\begin{aligned}
 a_{12} &= -0,3214460660319344; \\
 a_{13} &= 0,5171317054689054; \\
 a_{14} &= -0,07638415081461256; \\
 a_{21} &= -0,1141975612466556; \\
 a_{22} &= 0,21959991509101562; \\
 a_{23} &= -0,16395468495856477; \\
 a_{24} &= 0,08931282705796084; \\
 b_{12} &= 0,0050754025218325135; \\
 b_{13} &= 0,1418406260785935; \\
 b_{14} &= -0,05105322202628307; \\
 b_{23} &= -0,25993241878291007; \\
 b_{24} &= -0,053545571258447826; \\
 b_{34} &= -0,10649215525917112.
 \end{aligned}$$

Анализ результатов, приведенных на рис. 1, а и б, показал, что полином второго порядка более точно описывает результаты численного эксперимента, а среднеквадратичное отклоне-

ние $\Delta y_1 = 0,010856399661304732$ почти в 2,5 раза меньше чем, у полинома первого порядка.

На рис. 2, а приведены результаты интерполяции функции отклика y_2 полиномом первого порядка

$$y_2 = a_0 + a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 + a_{13}\tilde{x}_3 + a_{14}\tilde{x}_4,$$

где

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1,0313712998724762; \\
 a_{11} &= -0,18041130687284332; \\
 a_{12} &= 0,31739976015730714; \\
 a_{13} &= -0,00971645781842488; \\
 a_{14} &= 0,10614730703683457.
 \end{aligned}$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\Delta y_2 = 0,022166858117402752.$$

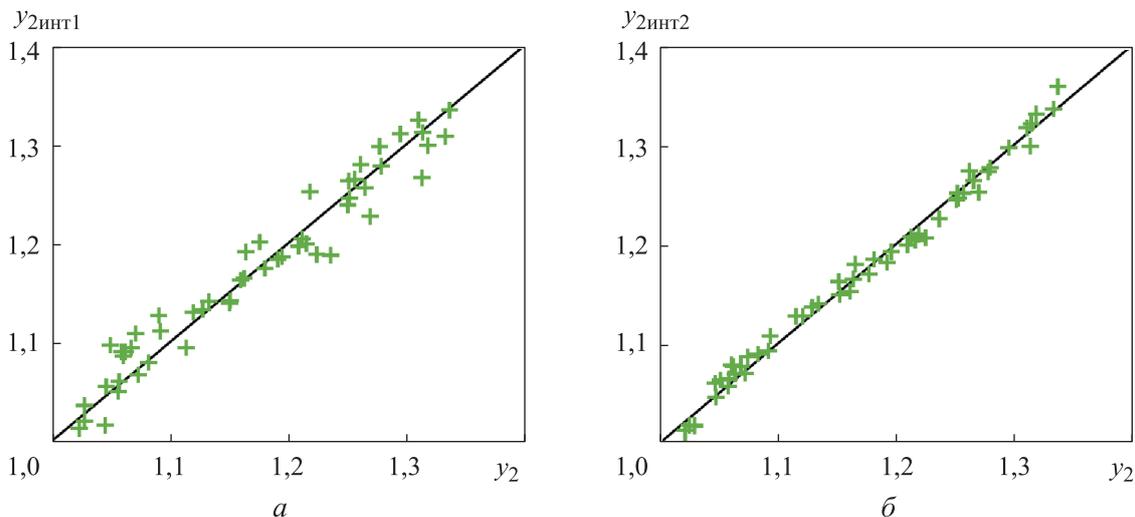


Рис. 2. Результаты интерполяции функции y_2 полиномами первого $y_{2инт1}$ (а) и второго $y_{2инт2}$ (б) порядков

На рис. 2, б приведены результаты интерполяции функции отклика y_2 полиномом второго порядка

$$y_2 = a_0 + a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 + a_{13}\tilde{x}_3 + a_{14}\tilde{x}_4 + a_{21}\tilde{x}_1^2 + a_{22}\tilde{x}_2^2 + a_{23}\tilde{x}_3^2 + a_{24}\tilde{x}_4^2 + b_{12}\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + b_{13}\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + b_{14}\tilde{x}_1\tilde{x}_4 + b_{23}\tilde{x}_2\tilde{x}_3 + b_{24}\tilde{x}_2\tilde{x}_4 + b_{34}\tilde{x}_3\tilde{x}_4,$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,0413923872399182; \\ a_{11} &= -0,4238547609622334; \\ a_{12} &= 0,4715017080354208; \\ a_{13} &= -0,10100405336821523; \\ a_{14} &= 0,21332287215893556; \\ a_{21} &= 0,2298695050109059; \\ a_{22} &= -0,12048540041044858; \\ a_{23} &= 0,05484550779084432; \\ a_{24} &= -0,15605689742738182; \\ b_{12} &= -0,127743822615002; \\ b_{13} &= 0,07042178034077407; \\ b_{14} &= 0,033879354943410614; \\ b_{23} &= -0,04837027918563067; \\ b_{24} &= 0,3449822848489476; \\ b_{34} &= 0,022497995383822786. \end{aligned}$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\Delta y_2 = 0,010182798885969532.$$

Как и для функции отклика y_1 , для y_2 интерполяция результата численного анализа с помощью полинома второго порядка более чем

в 2 раза увеличивает точность получаемых результатов.

Выводы

1. Предложена методика определения относительного выигрыша в технической работе, подводимой при сжатии, и показателя политроты конечных параметров процесса сжатия двухфазного рабочего тела упрощенным методом на основе интерполяционных полиномов, построенных для многомерного пространства, которое определяется основными независимыми переменными, оказывающих наибольшее влияние на целевые функции: относительное количество впрыскиваемой ОЖ, средний радиус капель ОЖ, давление нагнетания и число оборотов коленчатого вала.

2. Построенные регрессионные полиномы первого и второго порядков достаточно хорошо описывают изменения целевых функций от независимых переменных. Для полинома первого порядка среднеквадратичное отклонение составило 2,0...2,6 %, для полинома второго порядка — около 1 %.

3. Полученные полиномы можно использовать как в исследовательских целях, так и на практике.

Литература

- [1] Kotkas L., Zhurkin N., Donskoy A. et al. Design and mathematical modeling of a pneumatic artificial muscle-actuated system for industrial manipulators. *Machines*, 2022, vol. 10, no. 10, art. 885, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10100885>
- [2] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры*. Т. 1. *Теория и расчет*. Москва, Колос, 2006. 456 с.
- [3] Фотин Б.С., ред. *Поршневые компрессоры*. Ленинград, Машиностроение, 1987. 372 с.
- [4] Shcherba V.E., Khait A., Nosov E.Yu. et al. Numerical analysis of unsteady heat transfer in the chamber in the piston hybrid compressor with regenerative heat exchange. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 3, art. 363, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11030363>
- [5] Khait A., Shcherba V., Nosov E. Numerical and experimental investigation of the hybrid piston compressor using the novel multi-time-scale OpenFOAM®-based model. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 249, art. 123448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123448>
- [6] Щерба В.Е., Болштянский А.П., Азябин З.В. и др. *Способ работы системы жидкостного охлаждения машины объемного действия и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2763099. Заявл. 18.03.2021, опубл. 27.12.2021.
- [7] Щерба В.Е. *Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия*. Москва, Юрайт, 2019. 323 с.
- [8] Пластинин П.И., Щерба В.Е. *Рабочие процессы объемных компрессоров со впрыском жидкости*. Москва, ВИНТИ, 1996. 153 с.
- [9] Сакун И.А. *Винтовые компрессоры*. Ленинград, Машиностроение, 1970. 400 с.
- [10] Хлумский В. *Ротационные компрессоры и вакуум-насосы*. Москва, Машиностроение, 1971. 128 с.

- [11] Воропай П.И. Эффективный способ охлаждения воздуха в поршневых компрессорах. *Промышленная энергетика*, 1963, № 12, с. 24–29.
- [12] Слободянюк Л.И., Гогин Ю.Н. Охлаждение компрессора впрыском воды в цилиндр. *Известия ВУЗов. Энергетика*, 1961, № 9, с. 62–66.
- [13] Jin Y., Guo Y., Zhang S. et al. Study on the dynamic characteristics of the free piston in the ionic liquid compressor for hydrogen refuelling stations by the fluid-structure interaction modelling. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2023, vol. 48, no. 65, pp. 25410–25422, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.202>
- [14] Rafiq M.Y., Bugmann G., Easterbrook D.J. Neural network design for engineering applications. *Comput. Struct.*, 2001, vol. 79, no. 17, pp. 1541–1552, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00039-6)
- [15] Lagrandeur J., Poncet S., Sorin M. et al. Thermodynamic modeling and artificial neural network of air counterflow vortex tubes. *Int. J. Therm. Sci.*, 2019, vol. 146, art. 106097, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106097>
- [16] Iman R.L., Helton J.C., Campbell J.E. An approach to sensitivity analysis of computer models: Part I — Introduction, input variable selection and preliminary variable assessment. *J. Qual. Technol.*, 1981, vol. 13, no. 3, pp. 174–183, doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1981.11978748>
- [17] Iman R.L. Latin hypercube sampling. In: *Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment*. Wiley, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0299>
- [18] Dhuper K., Akula R., Duttagupta S. et al. Enhancement of heat transfer using conical fins for electronic cooling and their design optimization for maximum thermal regulation using ANN assisted NSGA II. *Int. J. Therm. Sci.*, 2024, vol. 202, art. 109092, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109092>

References

- [1] Kotkas L., Zhurkin N., Donskoy A. et al. Design and mathematical modeling of a pneumatic artificial muscle-actuated system for industrial manipulators. *Machines*, 2022, vol. 10, no. 10, art. 885, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10100885>
- [2] Plastinin P.I. *Porshnevyye kompressory*. T. 1. *Teoriya i raschet* [Piston compressors. Vol. 1. Theory and calculation.]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).
- [3] Fotin B.S., ed. *Porshnevyye kompressory* [Piston compressors]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 372 p. (In Russ.).
- [4] Shcherba V.E., Khait A., Nosov E.Yu. et al. Numerical analysis of unsteady heat transfer in the chamber in the piston hybrid compressor with regenerative heat exchange. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 3, art. 363, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11030363>
- [5] Khait A., Shcherba V., Nosov E. Numerical and experimental investigation of the hybrid piston compressor using the novel multi-time-scale OpenFOAM®-based model. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 249, art. 123448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123448>
- [6] Shcherba V.E., Bolshtyanskiy A.P., Azyabin Z.V. et al. *Sposob raboty sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya mashiny obemnogo deystviya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for operation of the liquid cooling system of the positive displacement machine and the device for its implementation]. Patent RU 2763099. Appl. 18.03.2021, publ. 27.12.2021. (In Russ.).
- [7] Shcherba V.E. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye porshnevyykh kompressorov obemnogo deystviya* [Theory, calculation and design of reciprocating compressors of volumetric action]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 323 p. (In Russ.).
- [8] Plastinin P.I., Shcherba V.E. *Rabochie protsessy obemnykh kompressorov so vpryskom zhidkosti* [Working processes of volumetric compressors with liquid injection]. Moscow, VINITI Publ., 1996. 153 p. (In Russ.).
- [9] Sakun I.A. *Vintovyye kompressory* [Screw compressors]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1970. 400 p. (In Russ.).
- [10] Khlumskiy V. *Rotatsionnyye kompressory i vakuuum-nasosy* [Rotary compressors and vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 128 p. (In Russ.).

- [11] Voropay P.I. Effective way of air cooling in reciprocating compressors. *Promyshlennaya energetika*, 1963, no. 12, pp. 24–29. (In Russ.).
- [12] Slobodyanyuk L.I., Gogin Yu.N. Cooling of a compressor by water injection into a cylinder. *Izvestiya VUZov. Energetika*, 1961, no. 9, pp. 62–66. (In Russ.).
- [13] Jin Y., Guo Y., Zhang S. et al. Study on the dynamic characteristics of the free piston in the ionic liquid compressor for hydrogen refuelling stations by the fluid-structure interaction modelling. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2023, vol. 48, no. 65, pp. 25410–25422, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.202>
- [14] Rafiq M.Y., Bugmann G., Easterbrook D.J. Neural network design for engineering applications. *Comput. Struct.*, 2001, vol. 79, no. 17, pp. 1541–1552, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00039-6)
- [15] Lagrandeur J., Poncet S., Sorin M. et al. Thermodynamic modeling and artificial neural network of air counterflow vortex tubes. *Int. J. Therm. Sci.*, 2019, vol. 146, art. 106097, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106097>
- [16] Iman R.L., Helton J.C., Campbell J.E. An approach to sensitivity analysis of computer models: Part I — Introduction, input variable selection and preliminary variable assessment. *J. Qual. Technol.*, 1981, vol. 13, no. 3, pp. 174–183, doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1981.11978748>
- [17] Iman R.L. Latin hypercube sampling. In: *Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment*. Wiley, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0299>
- [18] Dhuper K., Akula R., Duttgupta S. et al. Enhancement of heat transfer using conical fins for electronic cooling and their design optimization for maximum thermal regulation using ANN assisted NSGA II. *Int. J. Therm. Sci.*, 2024, vol. 202, art. 109092, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109092>

Статья поступила в редакцию 18.11.2024

Информация об авторах

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

КУЖБАНОВ Акан Каербаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: akan05@rambler.ru).

ГИЛЬДЕБРАНДТ Маргарита Ивановна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: rita.kononova.94@mail.ru).

КУДЕНЦОВ Владимир Юрьевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение», декан факультета довузовской подготовки. Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: vyukudentsov@omgtu.ru).

Information about the authors

SHCHERBA Viktor Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Hydromechanics and Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

KUZHBANOV Akan Kaerbaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Hydromechanics and Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: akan05@rambler.ru).

GILDEBRANDT Margarita Ivanovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: rita.kononova.94@mail.ru).

KUDENTSOV Vladimir Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Aviation and Rocket Engineering, Dean of the Faculty of Preuniversity Preparation. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: vyukudentsov@omgtu.ru).

ГАЛДИН Николай Семенович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Подъемно-транспортные машины, механика и гидропривод». Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 5, e-mail: galdin_ns@sibadi.org).

GALDIN Nikolay Semenovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines, Mechanics and Hydraulic Drive. Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Russian Federation, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 5, e-mail: galdin_ns@sibadi.org).

ГЛАДЕНКО Алексей Анатольевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: gladenko1961@yandex.ru).

GLADENKO Alexey Anatolievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Department of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: gladenko1961@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Щерба В.Е., Кужбанов А.К., Гильдебрандт М.И., Куденцов В.Ю., Галдин Н.С., Гладенко А.А. Разработка методики ускоренной оценки относительного выигрыша в подводимой в процессе сжатия технической работе и показателя политропы конечных параметров в поршневом компрессоре с двухфазным рабочим телом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 79–91.

Please cite this article in English as:

Shcherba V.E., Kuzhbanov A.K., Gildebrandt M.I., Kudentsov V.Yu., Galdin N.S., Gladenko A.A. Development of a method for accelerated assessment of the relative gain in the input technical work in the compression process and the polytropic index of the final parameters in a piston compressor with a two-phase working fluid. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 8, pp. 79–91.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Agile для адаптивности бизнеса
и создания инновационных продуктов»**

Авторы: П.А. Дроговоз, Д.А. Коренькова

В учебном пособии собран многолетний опыт использования agile-методологий для оптимизации бизнес-процессов и создания инновационных продуктов как в области информационных технологий, так и в других областях. Изложены причины того, почему Agile получил такое широкое распространение и продолжает оставаться актуальным, какова философия тех практик и процессов, которые используют ведущие российские и зарубежные компании.

Для студентов, изучающих информационные технологии, а также получающих управленческие специальности, желающих разобраться в особенностях создания ценности в компаниях-лидерах отрасли, а также всем, кто интересуется инструментами для улучшения рабочих процессов в своей компании.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>