

ПОЛУЧЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФАКТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

А. Д. Ваняшов¹, Д. В. Бычков², А. В. Беликов²

¹Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²АО «Газпромнефть-Омский НПЗ», Россия, 644040, г. Омск, пр. Губкина, 1

Выполнен анализ фактических эксплуатационных режимов работы центробежного компрессора, обеспечивающего циркуляцию водородсодержащего газа в реакторном блоке каталитической изомеризации метаксилола и этилбензола в ортоксилолы и параксилолы. Технологический процесс, а также состояние и свойства катализатора в реакторном блоке определяют концентрацию водорода и молекулярный вес газовой смеси, что, соответственно, приводит к необходимости регулирования режимов работы центробежного компрессора дросселированием на всасывании. Уточнена методика расчета газодинамических характеристик компрессора при регулировании дросселированием на всасывании с учетом особенностей работы в циркуляционном режиме, а именно изменения давления перед дроссельным устройством. Установлено, что при регулировании дросселированием на всасывании циркуляционного центробежного компрессора происходит изменение функции отношения давлений от объемной производительности. Установлено, что фактическая граница помпажа смещена относительно теоретической влево, в зону нисходящей части напорной характеристики.

Ключевые слова: центробежный компрессор, газодинамические характеристики, дросселирование на всасывании, водородсодержащий газ, граница помпажа, эксплуатационные режимы, рабочие точки.

Для цитирования: Ваняшов А. Д., Бычков Д. В., Беликов А. В. Получение газодинамических характеристик циркуляционного центробежного компрессора водородсодержащего газа на основе анализа фактических эксплуатационных режимов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 33–40. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-33-40. EDN: NISWJO.



© Ваняшов А. Д., Бычков Д. В., Беликов А. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

OBTAINING GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE CIRCULATION CENTRIFUGAL COMPRESSOR OF HYDROGEN-CONTAINING GAS BASED ON THE ANALYSIS OF ACTUAL OPERATING MODES

A. D. Vanyashov¹, D. V. Bychkov², A. V. Belikov²

¹Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²JSC "Gazpromneft-ONPZ", Russia, Omsk, Gubkin Ave., 1, 644040

The analysis of actual operating modes of a centrifugal compressor providing circulation of hydrogen-containing gas in a reactor block of catalytic isomerization of metaxylene and ethylbenzene into orthoxylenes and paraxylenes has been performed. The technological process, as well as the state and properties of the catalyst in the reactor block determine the concentration of hydrogen and the molecular weight of the gas mixture, which, accordingly, leads to the need to regulate the operating modes of the centrifugal compressor by throttling at the suction. The calculation method of the gas-dynamic characteristics of the compressor when regulating by throttling at the suction has been clarified, taking into account the features of operation in the circulation mode, namely, the change in pressure before the throttling device. It has been established that when regulating by throttling at the suction of a circulation centrifugal compressor, the function of the pressure ratio on the volumetric productivity changes. It is established that the actual

surge limit is shifted relative to the theoretical limit to the left, into the zone of the descending part of the pressure characteristic.

Keywords: centrifugal compressor, gas-dynamic characteristics, suction throttling, a hydrogen-containing gas, surge boundary, operating modes, operating points.

For citation: Vanyashov A. D., Bychkov D. V., Belikov A. V. Obtaining gas dynamic characteristics of the circulation centrifugal compressor of hydrogen-containing gas based on the analysis of actual operating modes. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 33–40. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-33-40. EDN: NISWJO.



© Vanyashov A. D., Bychkov D. V., Belikov A. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Актуальность и предмет исследования

Газодинамические характеристики (ГДХ) центробежных компрессоров (ЦК), представляющие зависимости энергетических параметров от расходных, являются необходимым инструментом для анализа возможных режимов работы агрегата с целью обеспечения какого-либо технологического процесса.

Размерные ГДХ ЦК обычно представляются в одном из двух видов: при постоянном начальном давлении на входе $P_n = \text{const}$; при постоянном конечном давлении на выходе $P_k = \text{const}$. Также задается начальная температура T_n и состав сжимаемого газа, который характеризуется газовой постоянной R , Дж/(кг·К) и показателем изэнтропы k .

Известно, что методы регулирования режимов работы ЦК, реализуемые с целью обеспечения требуемых технологических процессов, принято делить на группы [1]:

- 1) изменение характеристик компрессора;
- 2) изменение характеристик сети.

К первой группе относятся такие способы, как изменение частоты вращения ротора и изменение угла закрутки потока перед рабочими колесами входным направляющим аппаратом. Ко второй группе относятся такие способы, как дросселирование на всасывании и нагнетании, а также байпасирование.

Способы регулирования режимов работы ЦК второй группы являются неэффективными. Байпасирование используется как кратковременный режим в системах антипомпажной защиты, а также как длительный режим при наличии на байпасной линии газоохладителя. Дросселирование на нагнетании обычно используется как способ получения ГДХ ЦК при его испытаниях, а также иногда при эксплуатации для поддержания нужного технологического процесса.

При конструктивной и технологической схожести способов дросселирования на нагнетании и всасывании последний представляет собой более сложный процесс, связанный с изменением параметров газа на всасывании в ЦК и их влиянием на ГДХ.

Предметом исследования в данной работе является способ регулирования дросселированием на всасывании. Следует отметить, что проведенный анализ отечественных и зарубежных публикаций на тему исследований работы ЦК на режимах регулирования дросселированием на всасывании показал полное отсутствие работ по данному направлению за последние 20 лет. Практически единственными работами, где описан механизм изменения ГДХ ЦК при этом способе регули-

рования, являются работы Г. Н. Дена, В. Ф. Риса и Ф. М. Чистякова [1–3]. В то же время данный способ регулирования достаточно часто применяется на различных технологических объектах газоперерабатывающих, нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий, несмотря на развитие других способов регулирования, в том числе контроля положения рабочей точки, систем контроля и защиты от помпажа [4–11].

Известно [1–3], что при дросселировании на всасывании происходит изменение размерных ГДХ ЦК, например зависимости конечного давления от массовой производительности $P_k = f(G)$. При этом безразмерные параметры, например зависимости отношения давлений и КПД от объемной производительности $\varepsilon_k = f(Q)$, $\eta_n = f(Q)$, остаются неизменными [1–3]. Поэтому не очевидно относить данный способ регулирования в полной мере ко второй группе.

Графические материалы, описывающие механизм процесса дросселирования на всасывании, показаны на рис. 1.

Дроссельная заслонка или клапан, расположенный во всасывающей трубке компрессора (рис. 1а) и перемещаемый в различные положения на угол α , вызывает снижение давления и плотности газа на всасывании в компрессор по сравнению с полностью открытым дросселем ($P'_n < P_n$ и $\rho'_n < \rho_n$). Изменение начального давления при различных положениях дросселя показано на рис. 1б.

Начальное давление за дросселем может быть определено выражением:

$$P'_n = P_n \left(1 - 0,5 \cdot \zeta_{ai} \cdot Q^2 / (R \cdot T_n \cdot F_n^2) \right), \quad (1)$$

где ζ_{ai} — коэффициент сопротивления дросселя, зависящий от угла поворота α регулирующего элемента или степени закрытия (%) дросселя; F_n — площадь сечения всасывающего трубопровода, где установлен дроссель, м²; Q — объемная производительность, м³/с; $P'_n < P_n$ — соответственно давление газа после и до дросселя; T_n — температура газа до дросселя, К; R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В безразмерном виде соотношение между давлениями до и после дросселя получено из (1):

$$\frac{P'_n}{P_n} = 1 - 0,5 \cdot \zeta_{ai} \frac{Q^2}{F_n^2 R \cdot T_n}. \quad (2)$$

Принято считать [1–3], что процесс дросселирования является изоэнтальпийным, поэтому для иде-

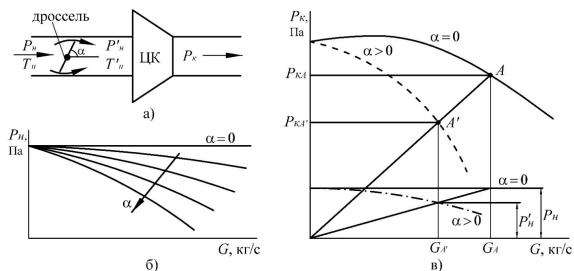


Рис. 1. Дросселирование на всасывании: а) схема; б) характеристика дроссельного устройства; в) изменение режима работы: точка *A* — исходный режим ($\alpha = 0$); точка *A'* — требуемый режим ($\alpha > 0$); — — — — открытый дроссель; — — — — закрытый частично дроссель

Fig. 1. Suction throttling: а) scheme; б) throttle device characteristic; в) change of operating mode: point *A* — initial mode ($\alpha = 0$); point *A'* — required mode ($\alpha > 0$); — — — — open throttle; — — — — partially closed throttle

ального газа температура газа при тчении через дроссель не меняется ($T'_n = T_n$).

Из уравнений состояния в случае открытой заслонки $P_n = \rho_n \cdot R \cdot T_n$ и прикрытой заслонки $P'_n = \rho'_n \cdot R \cdot T'_n$ следует соотношение:

$$P'_n/P_n = \rho'_n/\rho_n.$$

Учитывая, что окружная скорость не меняется $U'_2 = U_2$ (при неизменном числе оборотов, $n_{об} = idem$), будет выполняться условие динамического подобия по условным числам Маха $M'_{U2} = M_{U2}$:

$$\frac{U'_2}{\sqrt{k'R'T'_n}} = \frac{U_2}{\sqrt{kRT_n}}.$$

Для соблюдения условия кинематического подобия, т.е. равенства коэффициентов расхода $\phi'_2 = \phi_2$, должно выполняться равенство $Q' = Q$, т.е. объемная производительность по условиям всасывания, определяемая размерами рабочего колеса и числом оборотов, остается постоянной.

При этом массовая производительность изменится

$$G' = G \cdot (\rho'_n/\rho_n) = G \cdot (P'_n/P_n). \quad (3)$$

Для подобных режимов соблюдается равенство всех безразмерных параметров, в том числе и отношения давлений сжатия при открытом и прикрытом дросселе равны:

$$\varepsilon_k = \varepsilon'_k = \frac{P_k}{P_n} = \frac{P'_k}{P'_n}. \quad (4)$$

Из условия (4) очевидно, что $P'_k/P_k = P'_n/P_n$. С учетом (1) следует, что на рис. 1в исходная точка *A* и точка *A'*, определяющая режим работы после прикрытия дросселя, лежат на одной прямой, выходящей из начала координат.

Таким образом, поскольку режимы работы при полностью открытом и частично закрытом дросселе являются подобными, то безразмерные ГДХ ЦК останутся неизменными, однако размерные характеристики изменятся вследствие изменения начальных параметров газа (P'_n, ρ'_n).

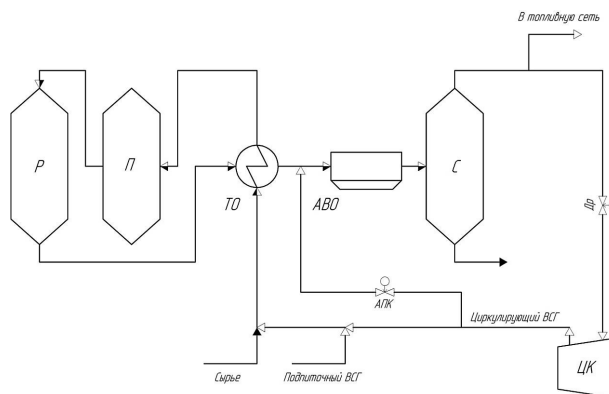


Рис. 2. Упрощенная технологическая схема реакторного блока каталитической изомеризации метаксилола и этилбензола в ортоксилолы и параксилолы: ЦК — центробежный компрессор; Р — реактор; П — печь; ТО — теплообменник; АВО — аппарат воздушного охлаждения; С — сепаратор; АПК — антипомпажный клапан; Др — дроссель

Fig. 2. Simplified flow chart of the reactor block for catalytic isomerization of metaxylene and ethylbenzene into orthoxylenes and paraxylenes: ЦК — centrifugal compressor; Р — reactor; П — furnace; ТО — heat exchanger; АВО — air cooler; С — separator; АПК — anti-surge valve; Др — throttle

Объект исследования

Объектом исследования является циркуляционный двухступенчатый центробежный компрессор водородсодержащего газа (ВСГ) с частотой вращения ротора 10 250 об/мин и приводом от электродвигателя через мультипликатор. В компрессорной установке предусмотрено регулирование дросселированием на всасывании.

Технологический процесс, а также состояние и свойства катализатора в реакторном блоке определяют концентрацию водорода и молекулярный вес газовой смеси, что, соответственно, приводит к необходимости регулирования режимов работы центробежного компрессора дросселированием на всасывании.

Упрощенная технологическая схема реакторного блока каталитической изомеризации метаксилола и этилбензола в ортоксилолы и параксилолы приведена на рис. 2. Циркулирующий ВСГ, который подается циркуляционным ЦК, смешивается с сырьем. Далее газосырьевая смесь нагревается в теплообменнике и печи, а затем поступает в реактор, где осуществляется процесс изомеризации. На выходе из реактора газопродуктовая смесь последовательно охлаждается в теплообменнике и аппарате воздушного охлаждения, после чего в сепараторе происходит разделение на жидкую и газообразную фазу, которая затем поступает на всасывание в ЦК. Давление в реакторном блоке регулируется за счет отвода части газовой смеси в топливную сеть, а концентрация водорода в циркулирующем ВСГ обеспечивается постоянной подпиткой свежим ВСГ.

Результаты исследования

Известные из классической литературы [1–3] методы теоретического получения ГДХ ЦК на режимах регулирования дросселированием на всасывании, а также исследования [5], опирающиеся на экспериментальные методы их получения, основаны на том, что начальное давление, соответствующее полностью открытому положению дросселя,

сохраняет свое значение при любой степени открытия дросселя α_i в сечении перед ним, т.е. выполняется условие $P_n = \text{const}$ при $P'_n = f(\alpha_i) = \text{var}$, при этом $\epsilon_k = f(Q; \alpha_i) = \text{const}$.

Особенностью рассматриваемой задачи является специфика работы циркуляционного ЦК, которая проявляется в существенной зависимости начального давления (на входе в ЦК) от конечного давления (на выходе из ЦК), что обусловлено влиянием гидравлического сопротивления системы, включая дроссельное устройство, а также состоянием и свойствами катализатора в реакторном блоке, изменением состава сжимаемого ВСГ в определенных пределах.

В связи с этим получение реальной размерной ГДХ ЦК в условиях эксплуатации, особенно в условиях технологической вариативности, затруднительно.

Анализ фактических эксплуатационных рабочих режимов показал, что происходило изменение состава ВСГ в определенных пределах по молекулярной массе или по газовой постоянной R от 1900 до 900 Дж/(кг·К).

Колебания газовой постоянной R относительно среднего значения находились в диапазоне $\pm 35\%$. Причем наиболее существенное изменение газовой постоянной R от примерно 1100...1300 Дж/(кг·К) до 1600...1700 Дж/(кг·К) произошло в результате замены в реакторном блоке старого катализатора, который выработал свой ресурс, на новый, который отличается по своим физико-химическим свойствам. Чтобы обеспечить эффективное выполнение химической реакции в реакторном блоке с новым катализатором, потребовалось регулирование производительности ЦК, что реализовывалось изменением положения дросселя на всасывании ЦК.

Для того чтобы привести различные условия эксплуатации ЦК, которые отличаются начальными параметрами (давлением, температурой, составом сжимаемого газа), к единым условиям, использованы методы пересчета ГДХ ЦК [12–14] с учетом изменения сопротивления системы на всасывающей линии прикрытием дросселя по методам [1–3].

Результаты получения ГДХ ЦК расчетом по классическому методу [1–3], основные уравнения которого приведены выше, при разной степени открытия дросселя α_i для наиболее легкого состава сжимаемого газа ($R_{cp} = 1600$ Дж/(кг·К)) показаны на рис. 3, а на рис. 4 — с нанесенными фактическими эксплуатационными режимами, пересчитанными на те же условия.

Видно, что фактические режимы достаточно хорошо совпадают с графиком функции конечного давления $P_k = f(G; \alpha_i)$, а с графиком функции отношения давлений $\epsilon_k = f(G; \alpha_i)$ совпадают только для полностью открытого дросселя. При этом отчетливо видны группы точек эксплуатационных режимов, соответствующих определенному положению дросселя. Это означает, что $\epsilon_k = f(Q; \alpha_i) \neq \text{const}$, а это возможно только когда $P'_n \approx \text{const}$ при увеличении степени прикрытия дросселя α_i в диапазоне рассматриваемых режимов. Объясняется это особенностью работы циркуляционных ЦК, при которой закрытие дросселя на всасывании приводит к повышению давления до него, а значит, вычисление давления после него следует производить уже от другого значения P'_n , которое можно обозначить как P'_{n1} . Кроме того, снижение производительности ЦК за счет прикрытия дросселя влечет за собой снижение скорости газа в элементах системы

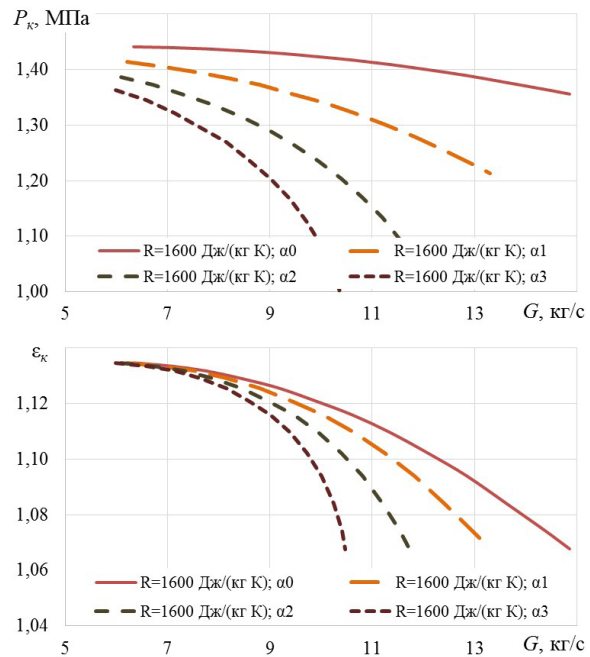


Рис. 3. ГДХ ЦК, полученные расчетом по классическому методу [1–3] при разной степени открытия дросселя α ($R = 1600$ Дж/(кг·К))

Fig. 3. Gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor obtained by calculation using the classical method [1–3] with different degrees of throttle opening α ($R = 1600$ J/(kg·K))

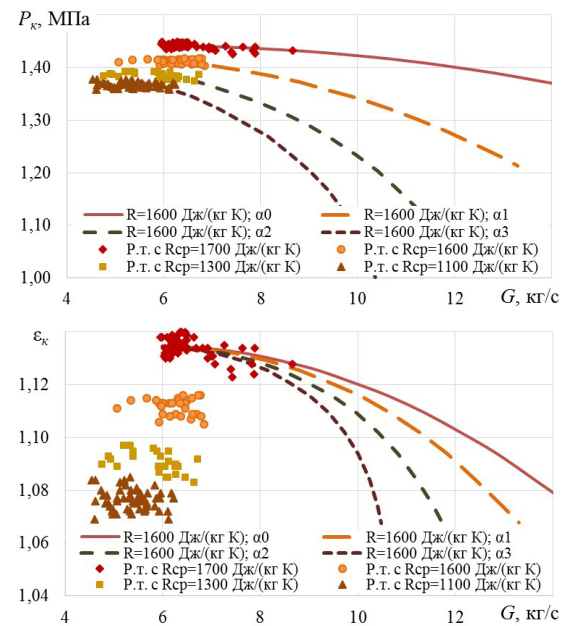


Рис. 4. ГДХ ЦК, полученные расчетом по классическому методу [1–3] при разной степени открытия дросселя α ($R = 1600$ Дж/(кг·К)) с фактическими эксплуатационными рабочими режимами, пересчитанными на те же условия

Fig. 4. Gas-dynamic characteristics of the centrifugal compressor obtained by calculation according to the classical method [1–3] with different degrees of α throttle opening ($R = 1600$ J/(kg·K)) with actual operating modes recalculated for the same conditions

циркуляционного контура, снижение его сопротивления и, соответственно, снижение давления нагнетания ЦК.

На рис. 5 нанесены фактические значения начального (на входе в ЦК) и конечного (на выходе

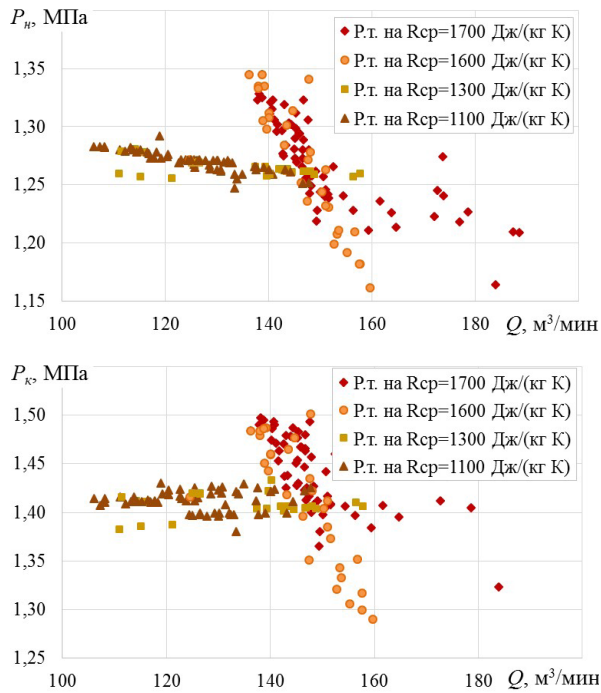


Рис. 5. Фактические зависимости начального P_n и конечного P_k давления от объемной производительности для различного состава ВСГ ($R = 1100; 1300; 1600; 1700$ Дж/(кг·К)) и степени открытия дросселя
Fig. 5. Actual dependence of initial P_n and final P_k pressure on volumetric capacity for different composition of hydrogen-containing gas ($R = 1100; 1300; 1600; 1700$ J/(kg·K)) and throttle opening degree

из ЦК) давления газа, соответствующие разным составам ВСГ и разной степени закрытия дросселя. Видно, что рабочие точки, характеризующие зависимость $P'_{nai} = f(Q)$ и соответствующие наибольшей степени закрытия дросселя, что имело место для наиболее тяжелого состава ВСГ ($R_{cp} = 1100$ и 1300 Дж/(кг·К)), подтверждают сказанное выше. Напротив, рабочие точки, соответствующие полностью открытому и минимально прикрытому дросселю, демонстрируют существенное снижение $P'_{nai} = f(Q)$.

С целью достоверного получения ГДХ на режимах регулирования дросселированием на всасывании циркуляционного ЦК предложена уточненная методика, которая основана на использовании из-

вестных значений давлений до (P_{nai}) и после (P'_{nai}) дросселя (на всасывании ЦК) в формуле (2).

Выполнив вычисления по формуле (2), получены значения коэффициентов сопротивления дросселя при разной степени его прикрытия.

Полученные зависимости $P'_{nai}/P_{nai} = f(Q; a_i)$ аппроксимированы и представлены в виде полинома 2-й степени

$$P'_{nai}/P_{nai} = 1 - a_i \cdot Q - b_i \cdot Q^2 \quad (5)$$

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчета для двух условий приведения режимов работы и ГДХ ЦК: к наиболее легкому и к наиболее тяжелому составам ВСГ, в которых также приведены эмпирические коэффициенты a_i и b_i для зависимости (5). Рекомендованные эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1 для уравнения (5), справедливы только для рассматриваемой системы. Для других объектов требуется их уточнение.

Результаты расчета ГДХ ЦК по уточненному методу с использованием зависимостей (2) и (5) для двух условий приведения, указанных в табл. 1, представлены соответственно на рис. 6 и 7.

По результатам видно, что полученные расчетные ГДХ на режимах регулирования достаточно хорошо совпадают с фактическими эксплуатационными режимами.

Установлено, что в случае регулирования дросселированием на всасывании циркуляционного ЦК происходит изменение (снижение) не только $P_k = f(Q)$, но и функции $\epsilon_k = f(Q)$, что, как было показано выше, объясняется ростом давления перед дросселем. Данное обстоятельство позволяет считать, что дросселирование на всасывании можно отнести также и к первой группе методов регулирования.

Следует иметь в виду, что полученные пересчетом зависимости с учетом регулирования дросселированием на всасывании являются справедливыми в случае, когда исходная характеристика (при $a_i = 0$ %) соответствует «паспортной» кривой. В случае изменения фактического состояния прочной части ЦК, т.е. износа (деградации), следует выполнить корректировку (адаптацию) ГДХ ЦК по результатам обработки эксплуатационных режимов [15].

Из анализа результатов, показанных на рис. 6 и 7, следует, что фактические рабочие режимы на-

Таблица 1. Результаты расчета режимов дросселирования на всасывании
Table 1. Results of calculation of throttling modes at suction

Режим работы, соответствующий составу ВСГ	P_{nai} , МПа	% закрытия	$\zeta_{\text{вд}}$	Эмпирические коэффициенты	
				a_i	b_i
Приведение к наиболее легкому составу ВСГ $R_{cp} = 1600$ Дж/(кг·К)					
$R_{cp} = 1700$ Дж/(кг·К)	1,27	0	0	—	—
$R_{cp} = 1600$ Дж/(кг·К)	1,296	15	25	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$R_{cp} = 1300$ Дж/(кг·К)	1,322	45	50	$3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$
$R_{cp} = 1100$ Дж/(кг·К)	1,34	65	70	$3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Приведение к наиболее тяжелому составу ВСГ $R_{cp} = 1100$ Дж/(кг·К)					
$R_{cp} = 1700$ Дж/(кг·К)	1,27	0	0	—	—
$R_{cp} = 1600$ Дж/(кг·К)	1,305	25	35	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$R_{cp} = 1300$ Дж/(кг·К)	1,342	65	70	$3 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$
$R_{cp} = 1100$ Дж/(кг·К)	1,37	90	95	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$

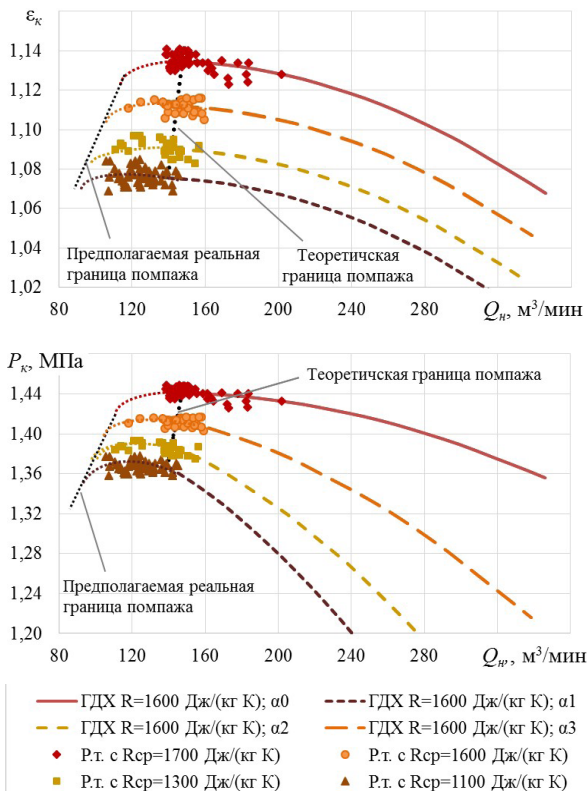


Рис. 6. Результаты пересчета ГДХ ЦК при разной степени открытия дросселя α по уточненному методу на более легкий состав ВСГ ($R = 1600$ Дж/(кг·К)) и фактические эксплуатационные рабочие режимы, пересчитанные на те же условия ($R = 1600$ Дж/(кг·К))
Fig. 6. Results of recalculation of gas-dynamic characteristics at different degrees of throttle opening according to the updated method for lighter composition of hydrogen-containing gas ($R = 1600$ J/(kg·K)) and actual operating modes recalculated for the same conditions ($R = 1600$ J/(kg·K))

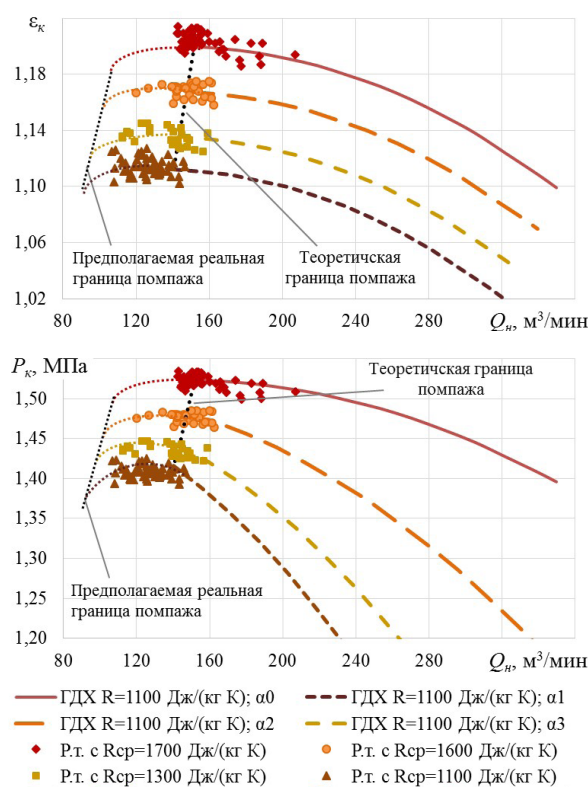


Рис. 7. Результаты пересчета ГДХ ЦК при разной степени открытия дросселя α по уточненному методу на более тяжелый состав ВСГ ($R = 1100$ Дж/(кг·К)) и фактические эксплуатационные рабочие режимы, пересчитанные на те же условия ($R = 1100$ Дж/(кг·К))
Fig. 7. Results of recalculation of gas-dynamic characteristics at different degrees of throttle opening according to the updated method for heavier composition of hydrogen-containing gas ($R = 1100$ J/(kg·K)) and actual operating modes recalculated for the same conditions ($R = 1100$ J/(kg·K))

ходящая значительно левее теоретической границы помпажа, установленной согласно «паспортным» ГДХ ЦК, причем часть рабочих режимов находится на нисходящей левой части напорной характеристики, которая отсутствовала на «паспортной» ГДХ. При этом ЦК работал на этих режимах устойчиво, признаков помпажа не наблюдалось. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о смещении реальной границы помпажа на режимах регулирования дросселированием на всасывании относительно теоретической влево по характеристике. На рис. 6 и 7 пунктирными линиями показан предполагаемый вид ГДХ в левой части кривых и предполагаемая реальная граница помпажа.

Заключение

Представленные результаты исследования характеризуют различные эксплуатационные режимы работы ЦК ВСГ, которые зависят от необходимого на данный момент технологического процесса, состояния и свойств катализатора в реакторном блоке, способов регулирования.

На основании проведенных исследований режимов эксплуатации циркуляционного ЦК в определенном диапазоне изменения состава ВСГ, степени закрытия дроссельного устройства на всасывании получены следующие результаты:

- уточнена методика расчета ГДХ при регулировании дросселированием на всасывании с учетом

особенностей работы циркуляционного ЦК, а именно изменения давления перед дроссельным устройством;

- получены зависимости изменения давления на дроссельном устройстве с эмпирическими коэффициентами, которые позволяют получать размерные ГДХ на режимах регулирования при изменении состава ВСГ;

- установлен факт изменения функции отношения давлений от производительности при изменении степени закрытия дроссельного устройства, что является особенностью циркуляционных ЦК;

- установлен факт смещения фактической границы помпажа относительно теоретической влево, в зону нисходящей части напорной характеристики.

Полученные рекомендации и уточненный метод расчета ГДХ для циркуляционных ЦК с регулированием дросселированием на всасывании могут быть использованы на различных технологических объектах газоперерабатывающих, нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий с целью внедрения в автоматизированные системы управления технологическими процессами. Это позволит вести мониторинг за изменением ГДХ ЦК при изменении технологических параметров и состава сжимаемого газа, в том числе с учетом регулирования, и корректировать границу помпажа, расширяя тем самым диапазон рабочих режимов.

1. Ден Г. Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров. Ленинград: Машиностроение, 1980. 232 с.
Den G. N. Proyektirovaniye protochnoy chasti tsentrobezhnykh kompressorov [Design of centrifugal compressors flow part]. Leningrad, 1980. 232 p. (In Russ.).
2. Рис В. Ф. Центробежные компрессорные машины. Ленинград: Машиностроение, 1981. 351 с.
Ris V. F. Tsentrobezhnyye kompressornyye mashiny [Centrifugal compressors]. Leningrad, 1981. 351 p. (In Russ.).
3. Чистяков Ф. М., Игнатенко В. В., Романенко Н. Т., Фролов Е. С. Центробежные компрессорные машины. Москва: Машиностроение, 1969. 327 с.
Chistyakov F. M., Ignatenko V. V., Romanenko N. T., Frolov E. S. Tsentrobezhnyye kompressornyye mashiny [Centrifugal compressors]. Moscow, 1969. 327 p. (In Russ.).
4. Евдокимов В. Е. Оптимальный способ регулирования компрессоров общего назначения // Энергетическое машиностроение. Экспресс-информация. Москва: НИИЭнформ-энергомаш, 1980. Вып. 1. С. 1–4.
Evdokimov V. E. Optimal'nyy sposob regulirovaniya kompressorov obshchego naznacheniya [Optimum control method for general purpose compressors]. *Energeticheskoye Mashinostroyeniye. Ekspress-informatsiya*. Moscow, 1980. Issue 1. P. 1–4. (In Russ.).
5. Кучеренко В. В., Гоголев П. В. Повышение эффективности эксплуатации компрессоров К-250 и К-500 // Компрессорная техника и пневматика. 2004. № 7. С. 6–9.
Kucherenko V. V., Gogolev P. V. Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii kompressorov K-250 i K-500 [Raising the operating efficiency of K-250 and K-500 compressors]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2004. No. 7. P. 6–9. (In Russ.).
6. Архипов В. В., Лысюк В. И., Чернин М. Е. Исследование и разработка нагнетателя природного газа с эффективным регулированием газодинамических характеристик // Компрессорная техника и пневматика. 2004. № 1. С. 5–7.
Arkhipov V. V., Lysyuk V. I., Chernin M. E. Issledovaniye i razrabotka nagnetatelya prirodnoy gaza s effektivnym regulirovaniyem gazodinamicheskikh kharakteristik [Research and development of a natural gas blower with efficient control of gas dynamic features]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2004. No. 1. P. 5–7. (In Russ.).
7. Байков И. Р., Файрушин Ш. З., Китаев С. В., Колотилов Ю. В. Повышение энергетической эффективности работы центробежных компрессоров большой мощности на примере нефтеперерабатывающего завода // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 31–35. EDN: XAGILL.
Baykov I. R., Fayrushin Sh. Z., Kitayev S. V., Kolotilov Yu. V. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti raboty tsentrobezhnykh kompressorov bol'shoi moshchnosti na primere neftepererabatyvayushchego zavoda [Raising energy efficiency of centrifugal compressors with high power by the example of oil refinery]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya. Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2016. No. 1. P. 31–35. EDN: XAGILL. (In Russ.).
8. Гузельбаев Я. З., Ибрагимов Е. Р., Лившиц Б. М., Луцев А. Т. Плюсы и минусы модернизации электроприводных ГПА с применением частотно-регулируемого привода // Газовая промышленность. 2014. № 12 (715). С. 59–61. EDN: TJUQUZ.
Guzelbayev Ya. Z., Ibragimov E. R., Livshits B. M., Lucev A. T. Plyusy i minusy modernizatsii elektroprivodnykh GPA s primeneniym chastotno-reguliruyemogo privoda [Pros and cons of modernisation of electric-drive GCUs with variable frequency drive]. *Gazovaya promyshlennost'*. *Gas Industry*. 2014. No. 12 (715). P. 59–61. EDN: TJUQUZ. (In Russ.).
9. Bentaleb T., Cacitti A., Franciscis S. De, Garulli A. Model Predictive Control for pressure regulation and surge prevention in centrifugal compressors. *2015 European Control Conference (ECC)*. 2015. P. 3346–3351. DOI: 10.1109/ECC.2015.7331051.
10. Mirsky S., Jacobson W., Tiscornia D. [et al.]. Development and design of antisurge and performance control system for centrifugal compressor. *Proceedings of the 42nd Turbomachinery and 29th Pump Symposium*. 2013. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/147258448.pdf> (accessed: 10.02.2025).
11. Jacobson W., Zaghoul M., Tolmatsky M. [et al.]. Compressor loadsharing control and surge detection techniques. *Proceedings of the 45th Turbomachinery and 32nd Pump Symposium*. 2016. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/147252842.pdf> (accessed: 10.02.2025).
12. Воронцов М. А., Глазунов В. Ю., Лопатин А. С. Математическое моделирование режимов работы высоконапорного многоступенчатого центробежного компрессора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 25–30. EDN: NUYPV.
Vorontsov M. A., Glazunov V. Yu., Lopatin A. S. Matematicheskoye modelirovaniye rezhimov raboty vysokonapornogo mnogostupenchatogo tsentrobezhnogo kompressora [Mathematical modeling of operation modes of a high pressure multistage centrifugal compressor]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya. Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2016. No. 1. P. 25–30. EDN: NUYPV. (In Russ.).
13. Ваяншов А. Д., Бородихин И. А., Зарипов В. А. [и др.]. Некоторые результаты поступенчатого пересчета газодинамических характеристик центробежных компрессоров на требуемые условия эксплуатации // Компрессорная техника и пневматика. 2011. № 7. С. 32–37. EDN: OJXVNT.
Vanyashov A. D., Borodikhin I. A., Zaripov V. A. [et al.]. Nekotoryye rezul'taty postupenchatogo perescheta gazodinamicheskikh kharakteristik tsentrobezhnykh kompressorov na trebuyemyye usloviya ekspluatatsii [Some incremental recalculation of gasodynamic performance of centrifugal compressors on involving conditions of exploitation]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2011. No. 7. P. 32–37. EDN: OJXVNT. (In Russ.).
14. Ваяншов А. Д. Применение методов пересчета газодинамических характеристик многоступенчатых и многосекционных турбокомпрессоров на другие условия работы в различных технологических установках // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 1. С. 42–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-42-52. EDN: UOIYEU.
Vanyashov A. D. Primeneniye metodov perescheta gazodinamicheskikh kharakteristik mnogostupenchatykh i mnogosektsionnykh turbokompressorov na drugie usloviya raboty v razlichnykh tekhnologicheskikh ustanovkakh [Application of methods of recalculation of gasdynamic characteristics of multi-staged and multisection turbocompressors on other conditions of work in various technological installations]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 1. P. 42–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-42-52. EDN: UOIYEU. (In Russ.).
15. Ваяншов А. Д., Юша В. Л. Методы и технологии адаптации основного и вспомогательного оборудования компрессорных установок и станций к нестабильным условиям эксплуатации // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 3. С. 24–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-24-35. EDN: JMGPPK.
Vanyashov A. D., Yusha V. L. Metody i tekhnologii adaptatsii osnovnogo i vspomogatel'nogo oborudovaniya kompressornykh ustanovok i stantsiy k nestabil'nyim usloviyam ekspluatatsii [Methods and technologies for adaptation of main and auxiliary equipment of compressor plants and stations to unstable operating

conditions]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 3. P. 24–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-24-35. EDN: JMGPPK. (In Russ.).

ВАНЯШОВ Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1103-5921

AuthorID (РИНЦ): 285096

AuthorID (SCOPUS): 8300390600

Адрес для переписки: adv@omgtu.ru

БЫЧКОВ Данил Витальевич, главный специалист управления надёжности АО «Газпромнефть-Омский НПЗ», г. Омск.

БЕЛИКОВ Александр Валерьевич, начальник управления надёжности АО «Газпромнефть-Омский НПЗ», г. Омск.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 16.05.2025.

VANYASHOV Aleksandr Dmitriyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1103-5921

AuthorID (RSCI): 285096

AuthorID (SCOPUS): 8300390600

Correspondence address: adv@omgtu.ru.

BYCHKOV Danil Vitalievich, Chief Specialist of the Reliability Department, JSC "Gazpromneft-ONPZ", Omsk.

BELIKOV Alexander Valerievich, Head of the Reliability Department, JSC "Gazpromneft-ONPZ", Omsk.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 21.04.2025; accepted for publication 16.05.2025.