

УДК 621.51

## Исследование вихревых эжекторных систем применительно к эксплуатации компрессорных станций

Р.Х. Саяхов<sup>1\*</sup>, Р.Р. Кантюков<sup>2</sup>, В.А. Футин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром трансгаз Казань», Российская Федерация, 420073, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, д. 41

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

\* E-mail: turbogazr@yandex.ru

**Тезисы.** Работа относится к теме исследования и анализа вихревых эжекторных систем и устройств, принцип действия которых заключается в использовании эффекта Ранка – Хилша. Показана возможность применения вихревых устройств в работе компрессорных цехов газоперекачивающих станций для откачки технологического газа из замкнутых объемов технологических трубопроводов с целью сокращения потерь от прямых выбросов метана и достижения энергоэффективности газотранспортных систем.

Поставлены и решены методами численного моделирования задачи формирования модели совместного использования вихревого эжекторного компрессора (ВЭК) и штатного центробежного компрессора для откачки природного газа из технологических коммуникаций компрессорной станции. Исследование планируется провести в два этапа: на первом этапе изучена модель откачки и оптимизированы геометрические характеристики ВЭК; на втором этапе будет проведен эксперимент в стендовых условиях.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) предполагает как применение прогрессивных энергосберегающих технологий, включая модернизацию энергопотребляющего оборудования, так и совершенствование структуры энергопотребления – постепенную переориентацию экономики страны на производство менее энергоемкой продукции. Анализ развития техники и технологий во всех отраслях промышленности показал, что за счет использования энергоэффективных технологий и оборудования можно добиться энергосбережения более чем на 50 %, за счет структурных изменений в промышленности – на 20...25 %, а за счет снижения всех видов прямых потерь ТЭР – лишь на 10...15 %. Таким образом, максимальная экономия ТЭР достигается благодаря внедрению и использованию прогрессивных энергосберегающих и экологически безопасных технологий и оборудования.

Современный уровень развития техники предъявляет высокие требования к создаваемым энергетическим и теплообменным установкам и устройствам. Например, в отношении авиационной и ракетной техники основные из этих требований сводятся к увеличению энерговооруженности, малым габаритам и весу, надежности, экономичности и отсутствию необходимости специального обслуживания; в промышленной теплоэнергетике и газонефтедобывающей отрасли это использование современных газовых технологий и вторичных энергоресурсов за счет создания замкнутых процессов. Применительно к последним удовлетворению названных требований могут служить газовые и теплообменные устройства, имеющие в своей основе закрученный поток газа. Закрученные сжимаемые потоки реализуются на практике в таких вихревых устройствах, как делительные трубы, самовакумирующиеся трубы, эжекторные насосы, трубы с дополнительным потоком и различные их комбинации и модификации [1].

На объектах Единой системы газоснабжения представляются возможными внедрение и использование эжекторных устройств, работающих совместно со штатными центробежными компрессорами (ЦК), что является альтернативой, и возможно, более выгодной по сравнению с другими существующими способами [2–6], характеризующимися большой металлоемкостью, сложными автоматикой и технологией процесса.

**Ключевые слова:**

вихревое устройство, эжектор, компрессор, центробежный нагнетатель, откачка газа.

Далее в статье изложены методологические аспекты численного моделирования течения в вихревом эжекторном компрессоре (ВЭК) с применением программного комплекса (ПК) Flow Vision [7], а также исследования течения в ВЭК и оптимизации геометрических параметров. Flow Vision позволяет по заданным конструктивным и режимным параметрам находить рабочие характеристики ВЭК, время откачивания и остаточное давление газа из замкнутого объема.

Конструкция и геометрические размеры ВЭК разрабатывались с использованием расчетных методов А.П. Меркулова [8]. На первом этапе исследования выполнен расчет модельного образца ВЭК (рис. 1). В качестве модели исследования принята принципиальная схема (рис. 2), содержащая ЦК [9] и ВЭК, связанные системой трубопроводов и арматурой – запорными (ЗК) и регулирующими (РК) кранами.

Flow Vision не имеет собственного геометрического процессора, поэтому геометрия ВЭК создавалась в САД-системе и затем конвертировалась в формат фасеточного представления STL (*англ.* stereo lithography format). После импортирования геометрической модели в ПК Flow Vision создавалась расчетная модель, определяемая типом модели с набором уравнений и констант для решения задачи, свойством сжимаемой среды (воздуха) и граничными условиями.

Применительно к рассмотренной задаче выбирали тип модели «полностью сжимаемая жидкость», которая позволяет моделировать течения вязкого газа при произвольных изменениях плотности, больших (турбулентных) числах Рейнольдса ( $Re > 10^4$ ) и произвольных числах Маха ( $M > 0,3$ ). Этот тип модели включает:

уравнения Навье – Стокса (закон сохранения импульса); уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости); закон сохранения энергии, записанный через полную энтальпию. В качестве модели турбулентности принята модель переноса сдвиговых напряжений (*англ.* SST) Ментера.

В расчетной модели принимались следующие условия:

- в качестве опорных параметров – давление  $P_{он} = 101300$  Па и температура  $T_{он} = 293$  К;
- на входе в сопло (см. поток 2 на рис. 1) – давление  $P_2$ , Па, и температура  $T_2$ , К, откачиваемого воздуха;
- на входе в тангенциальное сопло (см. поток 1 на рис. 1) – температура  $T_1$ , статическое давление  $P_1$  и плотность потока, определяемая как отношение заданного массового расхода  $G_1$  к площади входа;
- на выходе из ВЭК (см. поток 3 на рис. 1) – температура  $T_3$  и давление  $P_3$  потока воздуха, равные температуре и давлению на входе в ЦК;
- для стенок ВЭК задавали условие расчета пограничного слоя по логарифмическому закону, скорость на стенке при этом принималась равной нулю.

После проведения расчета с использованием средств постпроцессора ПК Flow Vision, позволяющего выполнять осреднение по площади и расходу, определяли статические и полные давления, абсолютные значения скорости, температуры в контрольных сечениях: на входе и выходе ВЭК. Указанные параметры в ПК Flow Vision рассчитываются как приращения к опорным величинам.

В результате исследования модельного ВЭК определена и подтверждена зависимость  $n = f(G_1)$ , где  $n$  – степень повышения давления

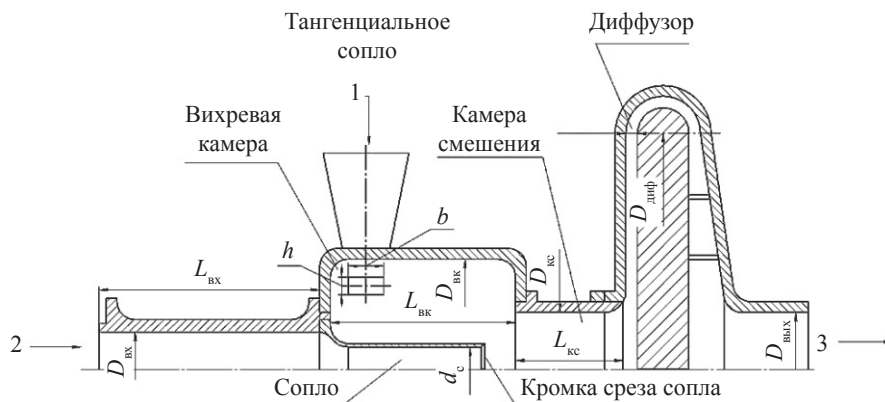


Рис. 1. Геометрическая модель ВЭК

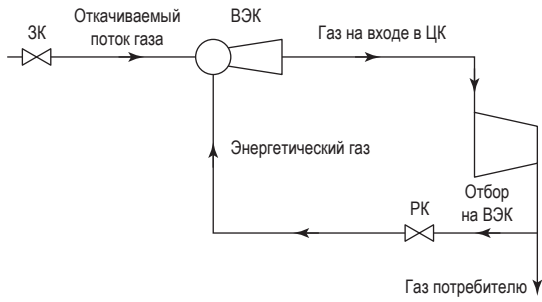


Рис. 2. Принципиальная схема откачки газа с использованием ВЭК и ЦК

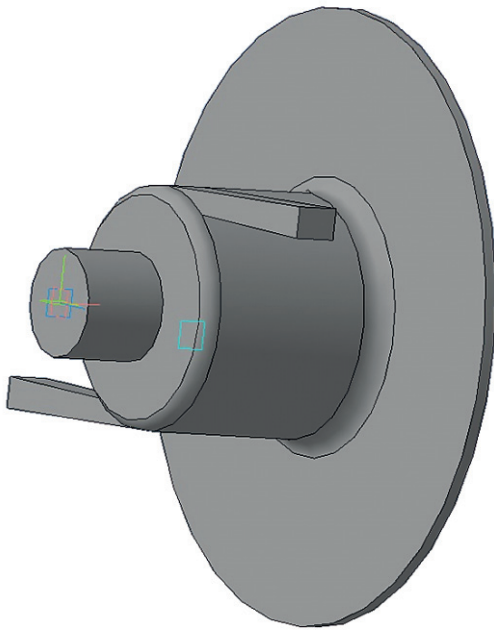


Рис. 3. Геометрическая модель оптимизированного ВЭК промышленного типа

газа [10], что дополнительно подтверждает выводы таких авторов, как М.Г. Дубинский, А.П. Меркулов, С.З. Копелев, А.О. Мацук и др. [1, 8, 10].

Анализ результатов исследования течения газа в модельном ВЭК и данных других источников [11] выявил неоптимальность геометрических размеров ВЭК и их соотношений. В связи с этим выполнена оптимизация геометрических параметров ВЭК для достижения минимальной глубины откачки газа из замкнутого контура. При оптимизации ВЭК приняты реальные условия работы:

- рабочая среда – природный газ метан (CH<sub>4</sub>);

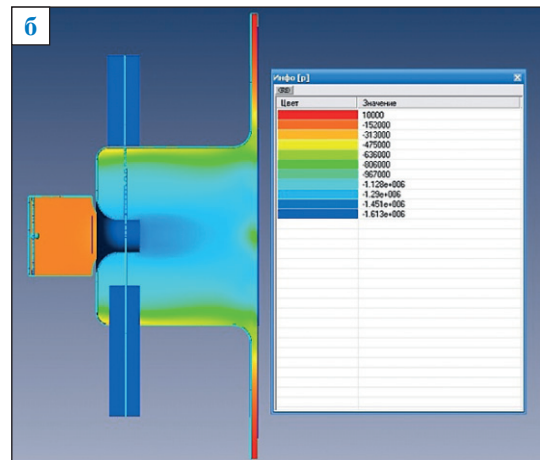
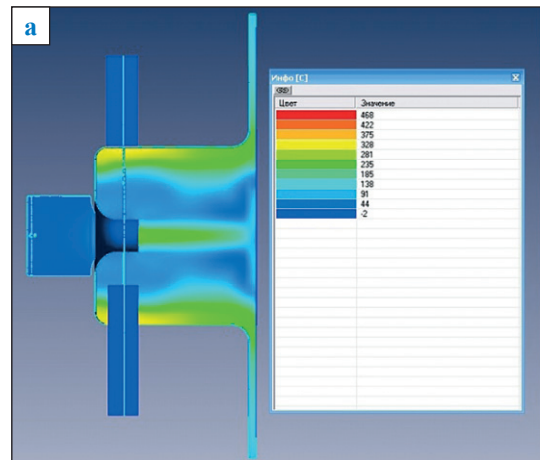


Рис. 4. Визуализация результатов расчета распределения скорости (а) и давления (б)

- подвод энергетического потока 1 с параметрами  $P_1 = 7,35$  МПа,  $T_1 = 288$  К и  $G_1 = 88$  кг/с;
- поток откачиваемой среды 2 с параметрами в начале процесса откачки воздуха  $P_2 = 5,39$  МПа и  $T_2 = 288$  К из замкнутого объема;
- смешанный поток 3, поступающий в ЦК Н-650-21-1 с параметрами  $P_3 = 5,39$  МПа и  $T_3 = 288$  К.

Расчет и оптимизация геометрических параметров выполнялись методом последовательных приближений. В результате множественных проб получены цифровой промышленный образец ВЭК и методика расчета аналогов применительно к местным (различным) условиям. Геометрическая модель оптимизированного ВЭК промышленного образца применительно к реальным условиям представлена на рис. 3.

Численное моделирование трехмерного течения среды в исследуемом оптимизированном устройстве выполнено также с использованием

ПК FlowVision. Тип модели с набором уравнений и констант для решения задачи выбран по аналогии с расчетом модельного ВЭК. Изменены физические параметры опорных величин, граничные условия и свойства среды (газ природный).

Результаты расчета распределения скорости и давления в продольном сечении промышленного образца ВЭК визуализированы посредством цветовой заливки на рис. 4, где значения давления (см. легенду на рис. 4б) соответствуют приращениям к  $P_{\text{он}} = 5,39$  МПа.

\*\*\*

Анализ выполненных расчетов показывает возможность применения исследованного ВЭК в промышленных условиях компрессорных цехов газоперекачивающих станций. Остаточное давление в замкнутом технологическом трубопроводе (оборудовании) компрессорного цеха при одноступенчатом ВЭК и начальном давлении откачки  $53 \text{ кгс/см}^2$  достигает  $33 \text{ кгс/см}^2$ .

На следующем этапе планируется экспериментальное исследование модельного (лабораторного) образца ВЭК в стендовых условиях. Проверка сходимости результатов расчета в ПК Flow Vision и данных эксперимента обеспечит подтверждение методики и возможности использования устройства в промышленных условиях.

### Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: учеб. руководство для вузов в 2-х ч. / Г.Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – Ч. 1. – 600 с.
2. Способ откачки газа из отключенного участка магистрального газопровода (варианты) и мобильная компрессорная станция для его осушения (варианты): Пат. 2465486 RU / Р.А. Кантюков, И.М. Тамеев, Р.Р. Кантюков и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Казань»; заявка № 2011120295/06 от 23.05.2011; опубл. 27.10.2012; бюл. № 30. МПК F04B 41/00, F04D 25/02.
3. Мобильная компрессорная станция для откачки газа из отключенного участка магистрального газопровода (варианты): Пат. 112290 RU / Р.А. Кантюков, И.М. Тамеев, Р.Р. Кантюков и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Казань»; заявка № 2011120296/28 от 23.05.2011; опубл. 10.01.2012; бюл. № 1. МПК F04B 41/00.
4. Устройство опорожнения участка магистрального трубопровода от газа: Пат. 118021 RU / Р.А. Кантюков, Р.К. Гимранов, Р.Р. Кантюков и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Казань»; заявка № 2012101586/06 от 17.01.2012; опубл. 10.07.2012; бюл. № 19. МПК F17D 1/02, F17B 1/26.
5. Компрессорная станция для перекачки газа (варианты): Пат. 2543710 RU / Р.А. Кантюков, Р.Р. Кантюков, М.Б. Хадиев и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Газпром трансгаз Казань»; заявка № 2014100437/06 от 09.01.2014; опубл. 10.03.2015; бюл. № 7. МПК F04D 27/00.
6. Карибуллина Ф.Р. и др. Организация ремонтных и сервисных работ газоперекачивающих агрегатов / Ф.Р. Карибуллина и др. – Казань: КНИТУ, 2016.
7. Руководство пользователя Flow Vision 5.6.
8. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике / А.П. Меркулов. – М.: Машиностроение, 1969. – 287 с.
9. Соколов Н.В. и др. Методика измерения и описания стенда для исследования газодинамики малорасходной центробежной ступени и упорного подшипника скольжения на нестационарных режимах / Н.В. Соколов и др. // Компрессорная техника и пневматика. – 2016. – № 4. – С. 10–16.
10. Саляхов Р.Х. Исследование вихревого эжекционного компрессора при работе с центробежным нагнетателем / Р.Х. Саляхов, Р.Р. Кантюков, В.А. Футин и др. // Труды XVII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. – Казань: Слово, 2017.
11. Гуцол А.Ф. Эффект Ранка: методические заметки / А.Ф. Гуцол // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. – № 6. – С. 665–687.

## Investigation of vortex ejector systems in relation to the operation of compressor stations

R.H. Salyakhov<sup>1\*</sup>, R.R. Kantyukov<sup>2</sup>, V.A. Futin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gazprom Transgaz Kazan, Bld. 41, Adelya Kutuya street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420073, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Projektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

\* E-mail: turbogazr@yandex.ru

**Abstract.** This paper deals with the research and analysis of vortex ejector systems and devices, the principle of operation of which is to use the Rank-Hilsch effect. The possibility of using vortex devices in the operation of compressor shops of gas pumping stations for pumping process gas from closed volumes of process pipelines in order to reduce losses from direct methane emissions and energy efficiency of gas transmission systems is shown. The following tasks were set and solved using numerical modeling methods: formation of a model for the joint use of a vortex ejector compressor (VEC) and a standard centrifugal compressor for pumping natural gas from the technological communications of a compressor station.

The tasks were planned to be solved in two stages. The first stage is fulfilled, it supposed studying a pumping model and optimizing the geometric characteristics of the VEC. The next stage, which is an experiment in bench conditions, is going to be executed later.

**Keywords:** vortex device, ejector, compressor, centrifugal supercharger, pumping gas.

### References

1. ABRAMOVICH, G.N. *Applied gas dynamics* [Prikladnaya gazovaya dinamika]: study guide in 2 pts. 5<sup>th</sup> ed., revised. Moscow: Nauka, glavnyaya redaktsiya fiz.-mat. literatyry, 1991, pt. 1. (Russ.).
2. GAZPROM TRANSGAZ KAZAN. *Method for gas pumping out of cut-out section of main gas line (versions), and mobile compressor station for its implementation (versions)* [Sposob otkachki gaza iz otklyuchennogo uchastka magistralnogo gazoprovoda (variant) b mobilnaya kompressornaya stantsiya dlya yego osushchestvleniya (varianty)]. Inventors: R.A. KANTYUKOV, I.M. TAMEYEV, R.R. KANTYUKOV, et al. Appl.: no. 2011120295/06 dated 23 May 2011; pub. 27 Oktober 2012, bull. no. 30. RU 2 465 486 C1. (Russ.).
3. GAZPROM TRANSGAZ KAZAN. *Mobile compressor station for gas evacuation from a deactivated section of a trunk gas pipeline* [Mobilnaya kompressornaya stantsiya dlya otkachki gaza iz otklyuchennogo uchastka magistralnogo gazoprovoda (varianty)]. Inventors: R.A. KANTYUKOV, I.M. TAMEYEV, R.R. KANTYUKOV, et al. Appl.: no. 2011120296/28 dated 23 May 2011; pub. 10 January 2012; bull. no. 1. RU 112290 U1. (Russ.).
4. GAZPROM TRANSGAZ KAZAN. *Device for deflating a section of a trunk gas pipeline* [Ustroystvo oporozhneniya uchastka magistralnogo truboprovoda ot gaza]. Inventors: R.A. KANTYUKOV, R.K. GIMRANOV, R.R. KANTYUKOV, et al. Appl.: no. 2012101586/06 dated 17 January 2012; pub. 10 July 2012; bull. no. 19. RU 118021 U1. (Russ.).
5. GAZPROM TRANSGAZ KAZAN. *Gas pumping compressor station (versions)* [Kompressornaya stantsiya dlya perekachki gaza (varianty)]. Inventors: R.A. KANTYUKOV, R.R. KANTYUKOV, M.B. KHADIYEV, et al. Appl.: no. 2014100437/06 dated 09 January 2014; pub. 10 March 2015; bul. no. 7. RU 2 543 710 C1. (Russ.).
6. KARIBULLINA, F.R., et al. *Arrangement of repair and support services for gas compressor units* [Organizatsiya remontnykh i servisnykh rabot gazoperekachivayushchikh agregatov]. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2016. (Russ.).
7. *Flow Vision 5.6: user guide*.
8. MERKULOV, A.P. *Eddy effect and its application in engineering* [Vikhrevoy effect i yego primeneniye v tekhnike]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969. (Russ.).
9. SOKOLOV, N.V., et al. Measurement and description procedure for a stand aimed at testing gas dynamics of a low-cost centrifugal stage and a thrust bearing on transient regimes [Metodika izmereniya i opisaniya stenda dlya issledovaniya gazodinamiki maloraskhodnoy tsentrobezhnoy stupeni i upornogo podshipnika skolzheniya na nestatsionarnykh regimakh]. *Kompressornaya Tekhnika i Pnevmatika*, 2016, no. 4, pp. 10–16. ISSN 2413-3035. (Russ.).
10. SALYAKHOV, R.X., R.R. KANTYUKOV, V.A. FUTIN, et al. Study of an eddy ejector compressor at work with a centrifugal blower [Issledovaniye vikhretokovogo ezhektsionnogo kompressora pri rabote s tsentrobezhnym nagnetatelem]. In: *Proc. of the 17<sup>th</sup> International scientific-technical conference on compressor machinery*. Kazan: Slovo, 2017. (Russ.).
11. GUTSOL, A.F. Ranque's effect: methodical notes [Effekt Ranka: metodicheskiye zametki]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1997, vol. 167, no. 6, pp. 665–687. ISSN 0042-1294. (Russ.).