

# Использование эжекторов для повышения выпускной способности подземных газохранилищ

Вольфганг Шахт, Франческа А. Слободкина

## 1. Введение

Хранение газа в подземных хранилищах является высокоэффективным методом, позволяющим осуществлять бесперебойные поставки газа по длинным транзитным трубопроводам независимо от сезонных и погодных условий. В летнее время, когда поставки превышают потребности, излишки газа поступают и хранятся в подземных хранилищах. В зимнее время, когда потребности превышают поставки, газ из хранилищ используется для их удовлетворения. Хранение газа осуществляется либо в пористых хранилищах, то есть, как правило, в водоносных пористых и проницаемых пластах, либо в больших пустых пространствах (кавернах), образованных в результате осуществленного растворения соляных пластов [1].

Ввод в действие подземных хранилищ только тогда становится эффективным, когда фирмам газоснабжения удастся в холодные дни с помощью накопленного газа покрыть заданный порог мощности и, таким образом, минимизировать годовые расходы на поставки газа.

Из каверн за относительно короткий период времени можно получить большие мощности с целью избежания пиковых поставок. Пористые хранилища не дают такой мощности, особенно в конце холодного длительного зимнего периода.

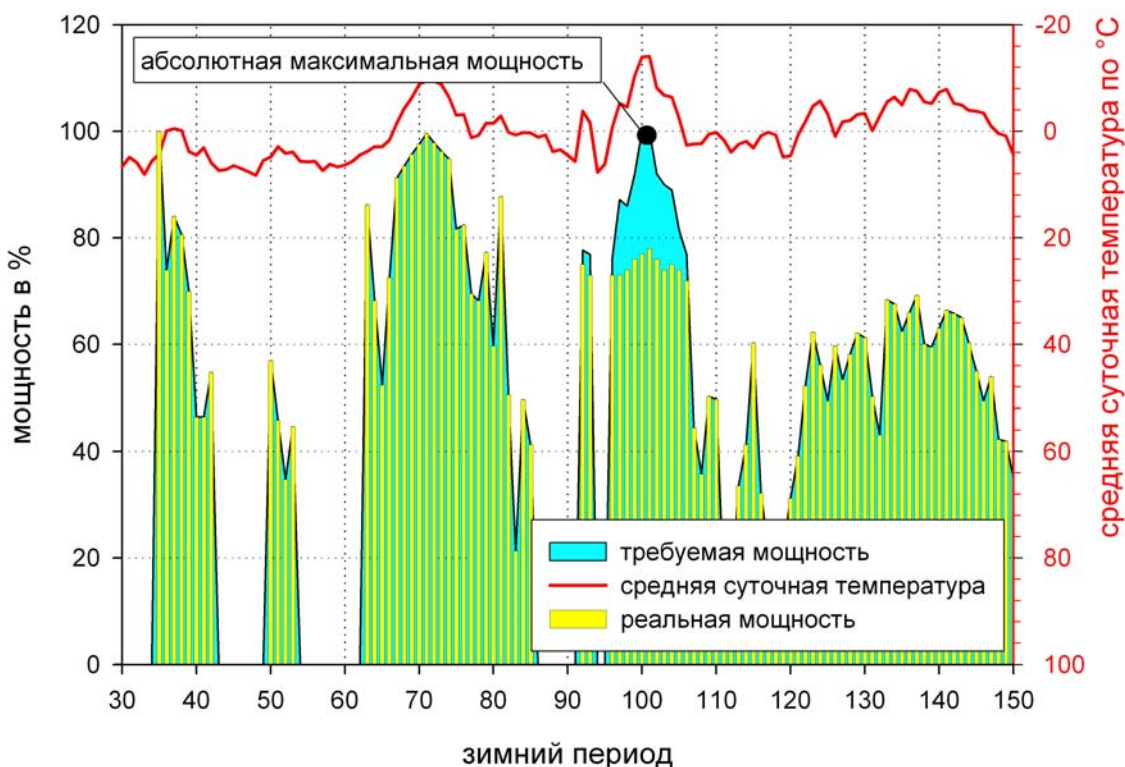


Рис. 1: Требуемые и реальные мощности пористого хранилища

В данной работе представлено использование газоструйного эжектора в целях повышения мощности и времени эксплуатации подобного подземного хранилища. Разработанная для этого программа на основании пакета MATLAB<sup>®</sup> универсально применима для расчета и конструкции любых газовых эжекторов.

В соответствии с DIN 24290 и DIN 24291 эжекторами являются «приборы или устройства для транспортировки или уплотнения газа, пара, жидкости или твердых веществ путем переноса кинетической энергии газо- или жидкообразной рабочей среды, которая путем расширения достигает высокой скорости и смешивается с эжектируемой средой» [3, 4].

Эжекторы в качестве струйных аппаратов с большим успехом используются во многих промышленных отраслях, таких как, химическая, нефтегазовая, экологическая, аэрокосмическая, а также в технологии электростанций. Простая конструкция и высокая надежность струйных эжекторов позволяет им соответствовать разнообразным требованиям. Стоимость их производства и приобретения весьма незначительна, малые размеры допускают их размещение в трубах в любом положении; не имея вращающихся деталей, они почти не подлежат износу. Эжекторы работают без утечек, помех, не нуждаются в техосмотре и обладают в связи с этим высокой производственной безопасностью. При наличии необходимого давления рабочей среды стоимость эксплуатации практически равна нулю.

Классификация эжекторов в соответствии с областью их применения, их обозначение в зависимости от рабочей и эжектируемой среды также приведены в вышеуказанных нормах [2, 3].

## 2. Основы расчета

В 1863 и 1870 г. G. Zeuner [4] и M. Rankin [5] впервые провели расчеты струйных эжекторов, которые в течение десятилетий оставались научной загадкой.

Впервые в строго научной и замкнутой форме они были представлены G. Flügel [6] в научно-исследовательском отчете Объединения немецких инженеров (VDI) в середине прошлого века. Метод расчета, основанный на известных уравнениях движения стационарных потоков (уравнение неразрывности, импульса и энергии) оправдал себя на практике для разработки эжекторов и входит сегодня в программу образования любого инженера-машиностроителя.

В связи с состоянием развития наук в те годы, особенно в гидро- и газодинамике, разработанная теория [6] не могла дать полного описания струйного эжектора. Для ответа на такие вопросы, как, например, выбор профиля проточной части аппарата, определение осевых размеров и выведение уравнения характеристики, необходимы более глубокие знания о процессах течения потока в эжекторе. Значительный вклад в решение этих задач сделали J. Wiegand [7], Г. Н. Абрамович [8, 9], Е. Я. Соколов и Н. М. Зингер [10]. Подробный анализ и оценка всех до сих пор известных методов расчета струйного эжектора дана в [11].

В технической литературе струйные аппараты одного и того же типа встречаются под самыми различными названиями [8, 10, 12, 13]. Согласно DIN 24290 и DIN 24291 в данной работе будут рассмотрены только газовые эжекторы, то есть эжекторы, предназначенные для транспортировки и сжатия газообразной среды в дозвуковой области. Рабочая и эжектируемая среды находятся в одинаковом агрегатном состоянии.

Газовый эжектор (Рис. 2) состоит из следующих четырех элементов: рабочего сопла, приемной камеры, камеры смешения и диффузора.

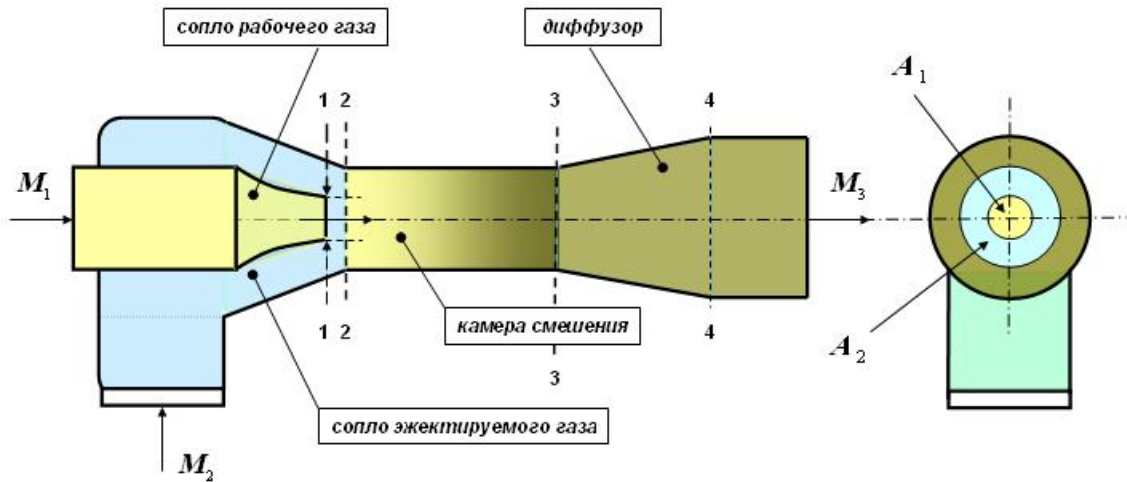


Рис. 2: Принципиальная схема эжектора

В сопле рабочего газа происходит ускорение текущего под высоким давлением рабочего газа до скорости  $u_1$ . Подвод эжектируемого газа осуществляется сквозь соответствующее сопло благодаря перепаду давления между рабочим и эжектируемым газом. Следствием этого является интенсивный импульсный обмен и турбулентное смешение рабочего и эжектируемого газов в камере смешения. В примыкающем к ней диффузоре часть скоростной энергии смешанного газа превращается в энергию давления. Поэтому на выходе из диффузора давление смешанного газа превышает давление эжектируемого газа на входе в эжектор.

В результате расчет эжектора ограничивается определением соответственных параметров на выходе из камеры смешения (Разрез 3) или диффузора (Разрез 4) на основании параметров течения рабочего и эжектируемого газов (Разрез 1 и 2).

Поток газа в любом отрезке камеры смешения описывается следующими законами [10] без учета теплопроводности через стенки камеры смешения и потерь от трения:

- сохранение массы

$$M_3 = M_1 + M_2; \quad (1)$$

$$\frac{M_3}{M_1} = n + 1; \quad n = \frac{M_2}{M_1}; \quad (2)$$

- сохранение энергии

$$h_1 + n \cdot h_2 = (1 + n) \cdot h_3 \quad ; \quad (3)$$

- сохранение импульса

$$I_1 + I_2 = \int_{A_3}^{A_2} p \cdot dA + I_3 \quad , \quad (4)$$

где

- $M_1, M_2, M_3$  , - массовые расходы рабочего, эжектируемого и смешанного потоков, кг/с;
- $n = \frac{M_2}{M_1}$  - коэффициент эжекции;
- $h_1, h_2, h_3$  - энтальпии рабочего и инжектируемого потоков до аппарата и смешанного потока после аппарата, кДж/кг;
- $I_1, I_2, I_3$  - импульс рабочего и инжектируемого и смешанного потоков, кг·м/с<sup>2</sup>;
- $\int_{A_3}^{A_2} p \cdot dA$  - интеграл импульса по боковой поверхности камеры смешения между сечениями 1 и 3 (для цилиндрической камеры равно нулю), кг·м/с<sup>2</sup>.

## Список литературы

- [1] Schacht, W.: Bewertung des technischen Zustandes und des wirtschaftlichen Betriebes von wasserführenden Porenspeichern.  
GWf-Gas / Erdgas 145 (2004) Nr. 2, S. 107 – 116
- [2] DIN 24290 vom August 1981
- [3] DIN 24291 vom April 1974
- [4] Zeuner, G.: Das Locomotiven – Blasrohr, Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Zugerzeugung durch Dampfstrahlen und über die saugende Wirkung der Flüssigkeitsstrahlen überhaupt.  
Verlag Meyer & Zeller, Zürich 1863
- [5] Rankine, M.: Miscellaneous scientific papers - Proceedings of the royal and other scientific and philosophical societies  
London 1881
- [6] Flügel, G.: Berechnung von Strahlapparaten, VDI Forschungsheft 395, Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“, Ausgabe B, Band 10, März/April 1939, VDI-Verlag GmbH, Berlin, S. 1 – 20
- [7] Wiegand, J.: Anwendung und Konstruktion von Dampf- und Gasstrahlapparaten  
Vortrag auf dem 93. Dachema - Kolloquium am 16.02.1962 in Frankfurt am Main  
Chemie-Ingenieur-Technik 34 (1962), Nr. 6, S. 448/449
- [8] Абрамович, Г. Н.: Прикладная газовая динамика  
издательство „Наука“, Москва 1991
- [9] Абрамович, Г. Н. и другие: Теория турбулентных струй  
издательство „Наука“, Москва 1984
- [10] Соколов, Е. Я. ; Зингер, Н. М.: Струйные аппараты  
издательство „ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ“, Москва 1989
- [11] Schacht, W.: Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Berechnung von Strahlpumpen für Flüssigkeiten und Gase (russ.)  
Teil I : Mischrohr mit konstantem Querschnitt, 133 Seiten, 77 Bilder, Matlab-Programm  
Teil II: Mischrohr mit variablem Querschnitt, 85 Seiten, 51 Bilder, Matlab-Programm  
2004 zur Veröffentlichung eingereicht
- [12] Pohlenz, W.: Pumpen für Flüssigkeiten und Gase  
Band 4: Pumpen für Gas  
VEB Verlag Technik, Berlin, 1977
- [13] Blenke, H.; Bohner, K.: Untersuchungen zur Berechnung des Betriebsverhaltens von Treibstrahlförderern  
Chemie-Ingenieur-Technik 35 (1963), Nr. 3, S. 201 – 208

- [14] Вяхирев Р. И.; Гриценко А. И.; Тер-Саркизов Р. М. Vyakhirev  
Разработка и эксплуатация газовых месторождений  
издательство „Недра-Бизнесцентр“, Москва 2002
- [15] Schulz, H.: Die Pumpen – Arbeitsweise Berechnungen Konstruktion  
Springer-Verlag, Berlin / Göttingen / Heidelberg, 1963
- [16] Слободкина, Ф. А.; Евтюхин, А. В.  
Математическое исследование газодинамических процессов в канале эжектора  
с пульсирующей активной струей  
Материалы XXV академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы  
развития отечественной космонавтики», Москва, 2004