

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКОГО КИСЛОРОДА, АРГОНА И АЗОТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF THE DISTILLATION COLUMN PRODUCTION OF LIQUID OXYGEN, ARGON AND NITROGEN UNDER DIFFERENT MODES OF FUNCTIONING

**F. Alekperli
S. Asgarova**

Summary. The article considers the determination of the optimal operation of the main apparatus — the distillation column for the production of oxygen, argon and nitrogen. The main purpose of the study is to determine the optimal modes of operation of the column. Production, depending on the needs of the product(s), operates in one of four modes — nitrogen mode, oxygen mode, oxygen-argon mode and oxygen-argon-nitrogen mode. The novelty of the work is the formulation and solution of scalar and vectorial optimization problems in all modes of operation of the distillation column. The article uses methods of identification, defasification and optimization. The optimal operating mode of the column is determined on the basis of deterministic equivalents of fuzzy Mamdani-type models obtained with the help of experts. The practical significance of the work is to improve the quality of production products. Examples of setting and solving optimization problems for all modes of production are given.

Keywords: multi-criteria optimization, fuzzy models, defasification, weight coefficients, operating mode.

Алекперли Фазин Азин оглы

*Д.т.н., профессор, Сумгаитский государственный университет (г. Сумгаит)
fazlf_50@mail.ru*

Аскерова Сахила Фаил кызы

*Диссертант, Сумгаитский государственный университет (г. Сумгаит)
sahile74@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается определение оптимальной работы основного аппарата — ректификационной колонны производства кислорода, аргона и азота. Основная цель исследования — определение оптимальных режимов работы колонной. Производство, в зависимости от потребности продукта (продуктов), работает в одном из четырех режимов — режим азота, режим кислорода, режим кислорода-аргона и режим кислорода-аргона-азота. Новизной работы является постановка и решения задач скалярных и векториальных задач оптимизации во всех режимах работы ректификационной колонны. В статье использованы методы идентификации, дефазификации и оптимизации. Оптимальный режим работы колонны определяется на основе детерминированных эквивалентов нечетких моделей типа Мамдани, полученных с помощью экспертов. Практическая значимость работы заключается в улучшении качества продуктов во время производства. Приводятся примеры постановки и решения задач оптимизации для всех режимов работы производства.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, нечеткие модели, дефазификация, весовые коэффициенты, режим работы.

Введение

Продукты производства применяются в различных областях, в частности кислород применяется в производстве стали, пластмассы, текстиля, в жизнеобеспечении самолетов, подводных кораблей, аргон применяется в основном для создания инертной и защитной среды, азот — в медицине, в производстве взрывчатых устройств и т.д. Таким образом, получение чистых продуктов имеет большое значение. Чистота продуктов определяется определением и соблюдением оптимального технологического регламента производства. В связи с этим задачи, рассмотренные в настоящей статье, представляют, как научное, так и практическое значение.

Краткое описание технологического процесса производства

Топологическая схема производства жидкого кислорода, аргона и азота завода технических газов (ЗТГ) Сумгаитского Технологического Парка (СТП) представлена на рис. 1.

Сырье производства — атмосферный воздух, проходя через воздушный фильтр 1, очищается от механических веществ. В блоке 2 осуществляется очистка от различных примесей, в частности от масел и влажности, сушка, охлаждение и сжатие воздуха. Жидкий воздух поступает в блок ректификационных колонн 3 и 4, в котором получают такие целевые продукты, как

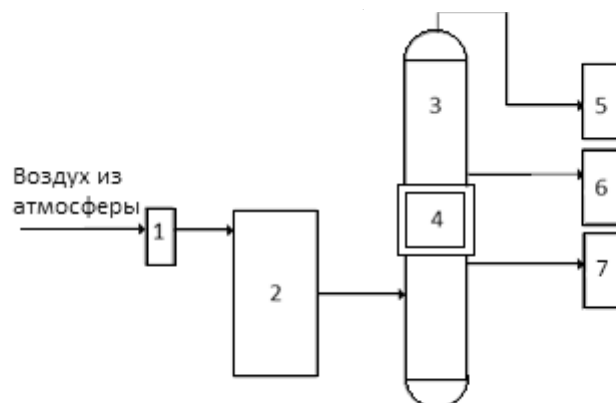


Рис. 1. Топологическая схема производства жидкого кислорода, аргона и азота
 1 — воздушный фильтр, 2 — блок очистки, сушки, охлаждения и сжатия воздуха,
 3 — ректификационная колонна, 4-промежуточная колонна, 5,6,7- емкости жидких продуктов

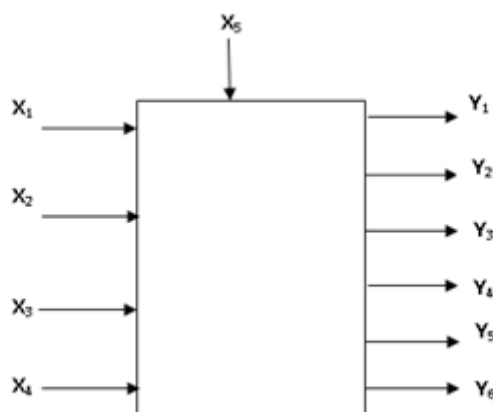


Рис. 2. Абстрагированная структура производства

кислород, аргон и азот, далее они поступают в соответствующие емкости 4, 5 и 6.

Основными показателями производства являются выходы и степени чистоты целевых продуктов, которые в большей степени зависят от технологического режима блока ректификационных колонн и давления воздушного фильтра, которые зависят от степени загрязнения фильтра. В рис. 2 представлена абстрагированная структура производства как объект оптимизации. На рисунке:

x_1 — температура жидкого воздуха на входе блока ректификации ($-200 \div -180$ °C);

x_2 — уровень кубового продукта в колонне 3 ($23 \div 30$ мбар);

x_3 — давление в колонне ($2.5 \div 6$ бар);

x_4 — уровень в промежуточной колонне ($70 \div 120$ мбар);

x_5 — давление воздушного фильтра ($-0.07 \div -0.01$ мбар);

y_1 — выход аргона ($15 \div 23 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}$);

y_2 — степень чистоты аргона ($99.55 \div 99.99\%$);

y_3 — выход азота ($500 \div 550 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}$);

y_4 — степень чистоты азота ($99.55 \div 99.99\%$);

y_5 — выход кислорода ($450 \div 600 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}$);

y_6 — степень чистоты кислорода ($99.55 \div 99.99\%$).

В зависимости от потребности того или иного продукта, производство может осуществляться в одном из следующих режимах: 1. Режим азота; 2. Режим кислорода; 3. Режим кислорода-аргона; 4. Режим кислорода-аргона-азота.

Необходимый режим работы производства обеспечивается технологическими изменениями [7].

Задача ОПТИМИЗАЦИИ

Задача оптимизации заключается в определении технологического режима, обеспечивающего наилучшего значения выбранного критерия или наилучших значений выбранных критериев в зависимости от режима работы производства и степени загрязнения воздушного фильтра.

Задачи режимов азота и кислорода представляют собой скалярные оптимизации, а задачи режимов кислорода-аргона и кислорода-аргона-азота векториальные (многокритериальные) оптимизации. Эти задачи математически можно сформулировать нижеследующими образами:

Задача оптимизации режима азота

$$\begin{aligned} y_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \rightarrow \max \\ y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{1min} \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{2min} \\ y_4 &= f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{4min} \\ y_5 &= f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{5min} \\ y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{6min} \\ x_{1min} &\leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} &\leq x_2 \leq x_{2max} \\ x_{3min} &\leq x_3 \leq x_{3max} \\ x_{4min} &\leq x_4 \leq x_{4max} \\ x_5 &= x_5^0 \end{aligned}$$

Задача оптимизации режима кислорода

$$\begin{aligned} y_5 &= f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \rightarrow \max \\ y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{1min} \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{2min} \\ y_3 &= f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{3min} \\ y_4 &= f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{4min} \\ y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{6min} \\ x_{1min} &\leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} &\leq x_2 \leq x_{2max} \\ x_{3min} &\leq x_3 \leq x_{3max} \\ x_{4min} &\leq x_4 \leq x_{4max} \\ x_5 &= x_5^0 \end{aligned}$$

Задача режима кислорода-азота

$$\begin{aligned} Y_{3,5} &= \left| \frac{y_3}{y_5} \right| \rightarrow \max \\ y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{1min} \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{2min} \\ y_4 &= f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{4min} \\ y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{6min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{1min} &\leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} &\leq x_2 \leq x_{2max} \\ x_{3min} &\leq x_3 \leq x_{3max} \\ x_{4min} &\leq x_4 \leq x_{4max} \\ x_5 &= x_5^0 \end{aligned}$$

Задача режима кислорода-азота-аргона

$$\begin{aligned} Y_{3,5} &= \left| \frac{y_3}{y_5} \right| \rightarrow \max \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{2min} \\ y_4 &= f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{4min} \\ y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \geq y_{6min} \\ x_{1min} &\leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} &\leq x_2 \leq x_{2max} \\ x_{3min} &\leq x_3 \leq x_{3max} \\ x_{4min} &\leq x_4 \leq x_{4max} \\ x_5 &= x_5^0 \end{aligned}$$

Идентификация математических моделей

При управлении производством технологический персонал в основном использует не числовые, а лингвистические данные. Это обстоятельство позволило составлять нечеткие модели процесса в виде продукции, т.е. модели типа Мамдани. С помощью экспертов — технологического персонала для всех входных и выходных перемен определены три лингвистические значения, такие как *ниже нормы (нн)*, *норма (н)* и *выше нормы (вн)*. Так как количество продукции определяется количеством входных переменных и их лингвистическими значениями, составлены продукции в количестве $N=3^5=243$ [2]. Таким образом, вышеприведенные задачи являются нечеткими задачами оптимизации. Одним из методов решения нечетких задач оптимизации является переход к их детерминированным эквивалентам [3]. С этой целью с помощью пакета Matlab составлена функция принадлежности для всех лингвистических значений перемен [5]. Используя функцию принадлежности методом «Центр тяжести» [4] дефазификации, вычислены численные эквиваленты всех лингвистических значений. Заменив лингвистические значения перемен соответствующими детерминированными эквивалентами во всех продуктах, получена таблица «статистических данных». На основе этих данных методом наименьших квадратов были сформулированы следующие детерминированные модели:

$$\begin{aligned} y_1 &= -12.92 - 0.176x_1 + 0.12x_2 + 0.06x_3 - 0.0041x_4 - 10.35x_5 \\ y_2 &= 98.61 - 0.001x_1 + 0.027x_2 - 0.008x_3 + 0.002x_4 - 6.73x_5 \\ y_3 &= 379.25 - 0.54x_1 - 0.159x_2 + 4.368x_3 + 0.204x_4 - 0.116x_5 \\ y_4 &= 98.89 - 0.004x_1 + 0.003x_2 + 0.006x_3 - 0.001x_4 - 8.876x_5 \\ y_5 &= 597.77 + 0.139x_1 - 1.719x_2 - 4.21x_3 + 0.0472x_4 - 10.828x_5 \\ y_6 &= 97.02 - 0.01x_1 + 0.011x_2 + 0.012x_3 + 0.0014x_4 - 18.92x_5 \end{aligned}$$

Постановка и решение скалярных задач оптимизации

Постановка задачи режима азота имеет нижеуказанные формулы:

$$y_3 = 379.25 - 0.54x_1 - 0.159x_2 + 4.368x_3 + 0.204x_4 - 0.116x_5 \rightarrow \max$$

$$y_1 = -12.92 - 0.176x_1 + 0.12x_2 + 0.06x_3 - 0.0041x_4 - 10.35x_5 \geq 15$$

$$y_2 = 98.61 - 0.001x_1 + 0.027x_2 - 0.008x_3 + 0.002x_4 - 6.73x_5 \geq 99.55$$

$$y_4 = 98.89 - 0.004x_1 + 0.003x_2 + 0.006x_3 - 0.001x_4 - 8.876x_5 \geq 99.55$$

$$y_5 = 597.77 + 0.139x_1 - 1.719x_2 - 4.21x_3 + 0.0472x_4 - 10.828x_5 \geq 450$$

$$y_6 = 97.02 - 0.01x_1 + 0.011x_2 + 0.012x_3 + 0.0014x_4 - 18.92x_5 \geq 99.55$$

$$-200 \leq x_1 \leq -180$$

$$23 \leq x_2 \leq 30$$

$$2.5 \leq x_3 \leq 6$$

$$70 \leq x_4 \leq 120$$

$$x_5 = -0.03$$

Результаты решения задачи оптимизации режима азота:

$$x_{1opt} = -200 \text{ }^\circ\text{Ц}; x_{2opt} = 23 \text{ мбар};$$

$$x_{3opt} = 6 \text{ бар}; x_{4opt} = 120 \text{ мбар};$$

$$y_1 = 20.8 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_2 = 99.82\%;$$

$$y_3 = 534.3 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_4 = 99.94\%;$$

$$y_5 = 511.2 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_6 = 99.99\%.$$

Постановка задачи режима кислорода:

$$y_5 = 597.77 + 0.139x_1 - 1.719x_2 - 4.21x_3 + 0.0472x_4 - 10.828x_5 \rightarrow \max$$

$$y_1 = -12.92 - 0.176x_1 + 0.12x_2 + 0.06x_3 - 0.0041x_4 - 10.35x_5 \geq 15$$

$$y_2 = 98.61 - 0.001x_1 + 0.027x_2 - 0.008x_3 + 0.002x_4 - 6.73x_5 \geq 99.55$$

$$y_3 = 379.25 - 0.54x_1 - 0.159x_2 + 4.368x_3 + 0.204x_4 - 0.116x_5 \geq 500$$

$$y_4 = 98.89 - 0.004x_1 + 0.003x_2 + 0.006x_3 - 0.001x_4 - 8.876x_5 \geq 99.55$$

$$y_6 = 97.02 - 0.01x_1 + 0.011x_2 + 0.012x_3 + 0.0014x_4 - 18.92x_5 \geq 99.55$$

$$-200 \leq x_1 \leq -180$$

$$23 \leq x_2 \leq 30$$

$$2.5 \leq x_3 \leq 6$$

$$70 \leq x_4 \leq 120$$

$$x_5 = -0.03$$

Результаты решения задачи оптимизации режима кислорода:

$$x_{1opt} = -180 \text{ }^\circ\text{Ц}; x_{2opt} = 23 \text{ мбар};$$

$$x_{3opt} = 2.5 \text{ бар}; x_{4opt} = 120 \text{ мбар};$$

$$y_1 = 17.06 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_2 = 99.83\%;$$

$$y_3 = 508.2 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_4 = 99.84\%;$$

$$y_5 = 528.7 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_6 = 99.84\%.$$

Постановка и решение векториальных задач оптимизации

Одним из способов решения векториальной задачи с критерием

$$Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} \rightarrow \max$$

является приведение векториальной задачи к скалярной с помощью критерия

$$Y = \lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2 + \dots + \lambda_n y_n \rightarrow \max,$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ весовые коэффициенты, которые отвечают условиям $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ [5].

Весовые коэффициенты можно определять различными способами [6]. Здесь используются следующие способы определения весовых коэффициентов [1]:

1. осуществляются максимизация по всем частным критериям при выполнении всех функциональных ограничений, и составляется таблица 1.

Таблица 1.

	y_1	y_2	...	y_n
y_1	y_{1max}	y_{21}	...	y_{n1}
y_2	y_{12}	y_{2max}	...	y_{n2}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
y_n	y_{1n}	y_{2n}	...	y_{nmax}

Таблица 2.

	v_1	v_2	...	v_n
v_1	1	v_{21}	...	v_{n1}
v_2	v_{12}	1	...	v_{n2}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
v_n	v_{1n}	v_{2n}	...	1
$\sigma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij}$	σ_1	σ_2	...	σ_n

Здесь y_{ij} — значение критерий y_i по максимизации y_j ;

- на основе данных таб. 1, которых можно представить по формуле

$$v_j = \frac{y_j - y_{i \min}}{y_{i \max} - y_{i \min}}$$

составляется таблица 2.

$y_{i \min}$ — определяется в результате минимизации по частным критериям.

- Используя данные, которые указаны на таб.2 по формулам

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_j} = \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \text{ и } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

определяются весовые коэффициенты λ_i .

Приведенными выше способами получены следующие весовые коэффициенты для:

- режима кислорода-аргона
 $\lambda_3 = 0.592, \lambda_5 = 0.408$;
- режима кислорода-аргона-азота
 $\lambda_1 = 0.258, \lambda_3 = 0.378, \lambda_5 = 0.364$.

Таким образом, постановка и решение задач оптимизации режимов кислорода-аргона и кислорода-аргона-азота можно определить следующим образом:

Задача оптимизации режима кислорода-аргона

$$y_{3,5} = 468.4 - 0.263x_1 - 0.7955x_2 + 0.868x_3 + 0.14x_4 - 4.4865x_5 \rightarrow \max$$

$$y_1 = -12.92 - 0.176x_1 + 0.12x_2 + 0.06x_3 - 0.0041x_4 - 10.35x_5 \geq 15$$

$$y_2 = 98.61 - 0.001x_1 + 0.027x_2 - 0.008x_3 + 0.002x_4 - 6.73x_5 \geq 99.55$$

$$y_4 = 98.89 - 0.004x_1 + 0.003x_2 + 0.006x_3 - 0.001x_4 - 8.876x_5 \geq 99.55$$

$$y_6 = 97.02 - 0.01x_1 + 0.011x_2 + 0.012x_3 + 0.0014x_4 - 18.92x_5 \geq 99.55$$

$$-200 \leq x_1 \leq -180$$

$$\begin{aligned} 23 \leq x_2 \leq 30 \\ 2.5 \leq x_3 \leq 6 \\ 70 \leq x_4 \leq 120 \\ x_5 = -0.03 \end{aligned}$$

Результаты решения задачи оптимизации режима кислорода-аргона:

$$x_{1opt} = -200 \text{ }^\circ\text{C}; x_{2opt} = 23 \text{ мбар};$$

$$x_{3opt} = 6 \text{ бар}; x_{4opt} = 120 \text{ мбар};$$

$$y_1 = 15.3 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_2 = 98.58\%;$$

$$y_3 = 541.6 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_4 = 99.8\%;$$

$$y_5 = 590.2 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_6 = 99.57\%.$$

Задача оптимизации режима кислорода-аргона-азота

$$Y_{1,3,5} = 357.61 - 0.1989x_1 - 0.6549x_2 + 0.1341x_3 + 0.0837x_4 - 6.66x_5 \rightarrow \max$$

$$y_2 = 98.61 - 0.001x_1 + 0.027x_2 - 0.008x_3 + 0.002x_4 - 6.73x_5 \geq 99.55$$

$$y_4 = 98.89 - 0.004x_1 + 0.003x_2 + 0.006x_3 - 0.001x_4 - 8.876x_5 \geq 99.55$$

$$y_6 = 97.02 - 0.01x_1 + 0.011x_2 + 0.012x_3 + 0.0014x_4 - 18.92x_5 \geq 99.55$$

$$-200 \leq x_1 \leq -180$$

$$23 \leq x_2 \leq 30$$

$$2.5 \leq x_3 \leq 6$$

$$\begin{aligned} 70 \leq x_4 \leq 120 \\ x_5 = -0.03 \end{aligned}$$

Результаты решения задачи оптимизации режима кислорода-аргона-азота:

$$x_{1opt} = -200 \text{ }^\circ\text{C}; x_{2opt} = 23 \text{ мбар};$$

$$x_{3opt} = 6 \text{ бар}; x_{4opt} = 120 \text{ мбар};$$

$$y_1 = 15.3 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_2 = 98.58\%;$$

$$y_3 = 541.6 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_4 = 99.8\%;$$

$$y_5 = 590.2 \frac{\text{Нм}^3}{\text{час}}; y_6 = 99.57\%.$$

Выводы

Приведено описание производства кислорода-аргона и азота, где указывается что оно в зависимости от потребности того или иного продукта (или продуктов) работает в различных режимах, которые устанавливаются технологическими способами. При этом разработчиками производства определен единый технологический регламент. Учитывая данный фактор, поставлены, и решены задачи оптимизации для каждого режима производства. Для этой цели составлены нечеткие модели типа Мамдани, с помощью метода «Центр тяжести» дефазификации получены эквивалентные детерминированные линейные модели.

Многокритериальные задачи с применением весовых коэффициентов приводятся к скалярным задачам. Задачи решены симплекс методом линейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банаюн Р., Ларичев О., Монгльфе Ж. и др. Линейное программирование с многими критериями. Метод ограничений // Автоматика и телемеханика, 1971, № 8. С. 108–115.
2. Алекперли Ф.А., Аскерова С.Ф. Получение нечеткой модели производства азота, аргона и кислорода на заводе технических газов // «Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств». Международной научно-технической конференции. УФА: Издательство УГНТУ. 2017. С. 187–189.
3. Гардашева Л.А. Нечеткая многокритериальная оптимизация на основе линейного программирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 5 (94). С. 122–127.
4. Дефазификация. [Электронный ресурс]: URL: https://studopedia.su/8_7091_defazzifikatsiya.html (Дата обращения: 12.04.2022).
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 262 с.
6. Петрова Н.С. Методы определения весовых коэффициентов при согласовании результатов оценки // Государственное и муниципальное управление в XXI веке: теория, методология, практика. 2016. № 21. С. 96–100.
7. Технологическая инструкция производства жидкого кислорода, азота и аргона на установке «ONAL-500 TC» (STP-ТТ/29–01). Сумгаит. 2013.