

6. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Byrgazov P.N. Uproshchennaya matematicheskaya model' issledovaniya potoka v zazore mezhdru plastinami [Simplified mathematical study model of the flow in the gap between plates] // *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proc. of Angarsk State Technical University]. Angarsk: AnGTU Publ., 2019. Vol. 1. No. 16. Pp. 137–142.
7. Al'tshul' A.D. Kiselev P.G. Gidravlika i aerodinamika (Osnovy mekhaniki zhidkosti): ucheb. posobie. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Hydraulics and Aerodynamics (Fundamentals of fluid mechanics): a textbook. 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1975. 327 p.
8. Tsegel'skii V.G. K teorii gazovykh ezhektorov s tsilindricheskoj i konicheskoi kamerami smesheniya [On the theory of gas ejectors with cylindrical and conical mixing chambers] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*, 2012. No. 2. Pp. 46–71.
9. Krasnov N.F. Aerodynamika. Ch. 2. Metody aerodynamicheskogo rascheta [Aerodynamics. P. 2. Methods of aerodynamic calculation]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1980. 416 p.
10. Gogrichiani G.V. Pnevmaticheskii struino-tenzometricheskii datchik polozheniya [Pneumatic jet-strain gauge position sensor] // *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva* [Mechanization and automation of production], 1988. No. 12. Pp. 15–16.
11. Pikner M.Ya. Issledovanie aerodinamicheskogo effekta dlya struinykh zakhvatnykh pitatelei [Investigation of the aerodynamic effect for jet gripper feeding mechanisms]. *Izvestiya vuzov* [Proceedings of Universities], No. 10. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. Pp. 16–169.
12. Gerts E.V. Pnevmaticheskie ustroystva i sistemy mashinostroeniya: spravochnik [Pneumatic devices and systems of mechanical engineering: a handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 218 p.
13. Fabrikant N.Ya. Aerodinamika [Aerodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 816 p.
14. Pogorelov V.I. Elementy i sistemy gidroavtomatiki. [Elements and systems of hydroautomatics]. Leningrad: Leningrad University Publ., 1979. 184 p.
15. Cherepanov A.P., Zemchenko A.V. Issledovanie rabocheho protsessa vzaimodeistviya elementarnoi poverkhnosti detali s razpoznayushchei yacheikoi retseptora struino-logicheskogo orientiruyushchego ustroystva (SLOU) [Investigation of the working process of interaction of the elementary surface of the part with the recognition cell of the receptor of the fluid-logic orienting device (FLOD)] // *Vestnik Chitinskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the Chita Polytechnic Institute], Iss. 3. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University, 1996. Pp. 317–328.
16. Cherepanov A. P. *Sposob obrazovaniya pul'satsii gazozhidkostnoi smesi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of the formation of pulsations of a gas-liquid mixture and a device for its implementation]. Patent of the Russian Federation No. 2657301, IPC B01D 3/14. Applicant is Angarsk State Technical University. Publ.: June 19, 2018. Bull. No. 17.
17. Cherepanov A.P. *Sposob ezhektirovaniya potoka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A flow ejection method and device for its implementation]. Patent of the Russian Federation no. 2705695, IPC F04F 5/44. // Applicant is Angarsk State Technical University. Publ.: November 11, 2019. Bull. No. 32.
18. Cherepanov A.P. Novye vozmozhnosti ispol'zovaniya bezotryvnogo techeniya potoka zhidkosti v uzkom zazore mezhdru plastinami [New possibilities of using the continuous flow of the liquid flow in a narrow gap between the plates]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern technologies and scientific and technological progress. Abstracts of scientific and technical conference reports]. Angarsk, 1994. Pp. 30.
19. Cherepanov A.P. Pnevmaticheskii rezonator uprugikh kolebanii plastin [Pneumatic resonator of elastic vibrations of plates] // *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress. Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern technologies and scientific and technical progress. Abstracts of scientific and technical conference reports]. Angarsk, 1995. Pp. 17.
20. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Byrgazov P.N. Ustroystvo ochistki vnutrennikh stenok tsyklona ot otlozhenii [A device for cleaning the inner walls of the cyclone from deposits] // *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2020. Vol. 1. No. 7. Pp. 85–86. DOI: 10.36629/2686-9896-2020-1-85-86.

### Информация об авторах

**Черепанов Анатолий Петрович** – д-р техн. наук, профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: boning89@mail.ru  
**Ляпустин Павел Константинович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: lpk62@mail.ru

### Information about the authors

**Anatolii P. Cherepanov** – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Road Transport Management, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: boning89@mail.ru  
**Pavel K. Lyapustin** – Ph.D. of Engineering Sciences, head of the Subdepartment of Road Transport Management, Federal Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: lpk62@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

УДК 658.5

## Оптимизация инфраструктуры промышленного предприятия с учетом статистического веса объектов

А. В. Бальчугов<sup>1</sup>, В. Е. Гозбенко<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vgozbenko@yandex.ru

**Резюме**

В статье выполнен анализ оптимизации промышленного производства на основе метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого производственного объекта. С использованием данного метода рассмотрена оптимизация системы энергоснабжения и водоотведения, вентиляционной системы и транспортной системы промышленного предприятия. Показано, что при определении статистического веса целесообразно использовать наиболее значимые характеристики объектов. Так, оптимизация системы энергоснабжения промышленного предприятия, использующего в качестве энергоносителя водяной пар, позволила на 18 % снизить потери давления на трение в паропроводе и повысить технико-экономические показатели процесса. Данный результат обусловлен тем, что при расчете статистического веса объекта (аппарата) обоснованно использовалось значение расхода водяного пара в данном аппарате. При этом, чем больше расход пара, тем выше статистический вес объекта. Как показали расчеты, в результате оптимизации системы водоотведения предприятия гидравлическое сопротивление водостока из-за трения снижается на 10 % и, как следствие, повышается его пропускная способность. Оптимизация системы приточной вентиляции на основе метода наименьших квадратов привела к снижению гидравлического сопротивления воздухопровода из-за трения на 13 % и снижению затрат мощности на подачу воздуха, при этом статистический вес объекта был поставлен в зависимость от расхода воздуха в конкретном помещении. Метод наименьших квадратов с учетом статистического веса объектов позволил также определить оптимальное расположение пропускных пунктов для персонала промышленного предприятия с целью снижения времени пребывания персонала в опасной зоне. При определении статистического веса каждого объекта в данном случае использовалась численность обслуживающего персонала на объекте: чем выше численность персонала, тем выше статистический вес объекта (цеха). Таким образом, показано, что метод наименьших квадратов с учетом статистического веса объектов является универсальным методом, позволяющим оптимизировать различные аспекты работы промышленного производства.

**Ключевые слова**

оптимизация промышленного производства, статистический вес объекта, метод наименьших квадратов, оптимизация системы энергоснабжения, система водоотведения, промышленная безопасность

**Для цитирования**

Бальчугов А.В. Оптимизация инфраструктуры промышленного предприятия с учетом статистического веса объектов / А. В. Бальчугов, Е. В. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 67–76. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 10.01.2021, поступила после рецензирования: 17.01.2021, принята к публикации: 20.01.2021

## Optimization of the industrial enterprise infrastructure taking into account the statistical weight of objects

A. V. Bal'chugov<sup>1</sup>, V. E. Gozbenko<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vgozbenko@yandex.ru

**Abstract**

This article analyzes the optimization of industrial production, carried out based on the least squares method, taking into account the statistical weight of each production facility. Using this method, the optimization of the power supply and wastewater disposal system, the ventilation system and the transport system of an industrial enterprise is considered. It is shown that when determining the statistical weight, it is advisable to use the most significant characteristics of objects. Thus, the optimization of the power supply system of an industrial enterprise, using water vapor as an energy carrier, made it possible to reduce friction pressure losses in the steam line by 18% and increase the technical and economic indicators of the process. This result is due to the fact that when calculating the statistical weight of the object (apparatus), the value of the water vapor consumption in this apparatus was reasonably used. The higher the steam consumption, the higher the statistical weight of the object. Calculations have shown that as a result of optimization of the drainage system of the enterprise, the hydraulic resistance of the drain due to friction is reduced by 10% and, as a result, its throughput increases. Optimization of the supply ventilation system based on the least squares method led to a 13% decrease in the hydraulic resistance of the air duct due to friction and to a decrease in power consumption for air supply, while the statistical weight of the object was set depending on the air flow rate in a particular room. The method of least squares, taking into account the statistical weight of objects, also made it possible to determine the optimal location of checkpoints for the personnel of an industrial enterprise in order to reduce the time spent by personnel in the danger zone. In determining the statistical weight of each facility, in this case, the number of maintenance personnel at the facility was used. The higher the number of personnel, the higher the statistical weight of the object (workshop). Thus, it is shown that the least squares method, taking into account the statistical weight of objects, is a universal method that allows you to optimize various aspects of industrial production.

**Keywords**

optimization of industrial production, statistical weight of the object, the least squares method, optimization of the energy supply system, water disposal system, industrial safety

**For citation**

Bal'chugov A. V., Gozbenko E. V. Optimizatsiya infrastruktury promyshlennogo predpriyatiya s uchetom statisticheskogo vesa ob'ektov [Optimization of the industrial enterprise infrastructure taking into account the statistical weight of objects]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 67–76. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).67-76

**Article Info**

Received: 10.01.2021, Revised: 17.01.2021, Accepted: 20.01.2021

**Введение**

Оптимальная организация инфраструктуры промышленного производства с целью экономии энергетических и сырьевых ресурсов, повышения безопасности эксплуатации и снижения экологического ущерба является актуальной задачей [1]. При анализе инфраструктуры производства необходимо учитывать уровень функциональной значимости объектов, из которых состоит производство [2–6]. Значимость промышленного объекта определяется различными факторами, такими как численность персонала, обслуживающего объект, производительность объекта, энергопотребление, особенности расположения на территории промышленной площадки и т. д. Значимость объекта важно учитывать при разработке оптимальной инфраструктуры производства: его энергетической, водопроводной и вентиляционной систем.

**Метод оптимизации**

Значимость промышленного объекта с точки зрения математической статистики является аналогом статистического веса объекта [7]. Поэтому при решении ряда задач по оптимальной организации производства плодотворным является использование метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта, составляющего производство. Так, если точке (объекту) с координатами  $(x_i, y_i)$  соответствует статистический вес  $\omega_i$ , то необходимо минимизировать сумму:

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $n$  – число точек (объектов).

После преобразований уравнения (1) получаем:

$$a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i x_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot y_i. \quad (2)$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют систему уравнений с двумя неизвестными  $a$  и  $b$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются по формулам Крамера [8–11]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i / \sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i}}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} - \frac{a \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (5)$$

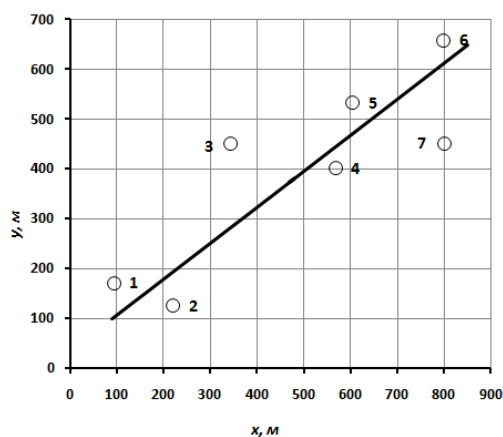
**Результаты оптимизации**

Применим метод наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта для оптимизации системы энергоснабжения промышленного предприятия в случае, когда теплоносителем является водяной пар. Далее приведен схематичный план территории предприятия, на которой расположены аппараты ( $n = 7$ ), потребляющие водяной пар (рис. 1). При оптимальном расположении магистрального паропровода для снабжения водяным паром этих аппаратов гидравлические потери при транспортировке водяного пара к аппаратам будут минимальными. При этом суммарные гидравлические и тепловые потери в паропроводе будут минимальны, если сумма квадратов расстояний от магистрального трубопровода до аппаратов будет минимальна.

Приведены координаты расположения каждого аппарата (табл. 2) и сведения о потреблении пара приведены в табл. 1. Начало системы координат выбирается произвольно. Принимаем, что при расходе пара  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  (аппарат № 1) статистический вес аппарата равен 1. Исходя из этого, можно рассчитать статистический вес каждого аппарата (табл. 2) по формуле:

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_1}, \quad (6)$$

где  $V_i$  – расход пара в аппарате  $i$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .



**Рис. 1.** План расположения аппаратов на предприятии:

○ – аппарат, потребляющий водяной пар;  
линия – магистральный паропровод

**Fig. 1.** Layout of apparatuses at a plant:

○ – apparatus that consumes water vapor;  
line – main steam pipeline

**Таблица 1.** Сведения о потреблении водяного пара  
**Table 1.** Information on the consumption of water vapor

Номер аппарата	Расход пара, м <sup>3</sup> /ч
1	100
2	550
3	150
4	200
5	650
6	100
7	180

**Таблица 2.** Координаты и статистический вес объектов

**Table 2.** Coordinates and statistical weight of objects

Номер аппарата	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес, $\omega_i$
1	93	171	1,0
2	220	125	5,5
3	343	354	1,5
4	567	402	2,0
5	604	532	6,5
6	799	658	1,0
7	800	450	1,8

По уравнениям (4) и (5) рассчитаем коэффициенты:  
 $a = 0,7222$ ;  $b = 35,1928$ . Уравнение, описывающее положение магистрального паропровода, примет вид:

$$y = 0,7222 \cdot x + 35,1928 \quad (7)$$

На рис. 1 линией показано наилучшее расположение паропровода, соответствующее уравнению (7). Магистральный паропровод с каждым аппаратом соединяется отдельным паропроводом малого диаметра.

Выполнен расчет гидравлического сопротивления (потерь давления на трение) для двух вариантов схем паропровода: без учета статистического веса аппарата и с учетом по уравнению из работы [12, 13]:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения [13];  $L$  – длина паропровода, м;  $d$  – диаметр паропровода, м;  $\rho$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость пара в паропровode, м/с. Диаметр основного паропровода принимался равным 0,2 м; боковых ответвлений 0,08 м. Установлено, что суммарное сопротивление трения в паропровode, рассчитанном без учета статистического веса, составит  $\Delta p_1 = 5\,787$  Па, а при втором варианте  $\Delta p_2 = 4\,746$  Па, т. е. гидравлическое сопротивление паропровода снизится на 18 %.

Таким образом, метод наименьших квадратов с учетом статистического веса (значимости) каждого аппарата позволил определить наилучшую схему основного паропровода, при которой гидравлические потери будут минимальны.

Анализ состояния системы объектов на основе метода наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого объекта позволяет также определить условия, при которых производительность производства будет максимальна. На промышленном производстве имеются семь емкостей с водой на разных уровнях относительно поверхности земли (рис. 2). Из емкостей самотеком сливается вода в центральный водопровод. Необходимо определить наилучшее расположение водостока, при котором его гидравлическое сопротивление будет минимальным и, следовательно, будет максимальной пропускная способность водостока. Приведены сведения о максимально возможных значениях расхода воды, стекающей с каждой емкости (табл. 3).

Пронумерованными точками обозначим место выхода воды из каждой емкости и нанесем эти точки на систему координат. Оси расположим произвольно (рис. 3). Занесем координаты всех точек (табл. 4). В данном случае для удобства примем ось  $ox$  вертикальной, а ось  $oy$  горизонтальной. Статистический вес точки в данном случае будет связан с максимально возможным расходом воды. При расходе 100 м<sup>3</sup>/ч примем вес точки равным 1 (табл. 4).

**Таблица 3.** Сведения о расходе воды  
**Table 3.** Information on water consumption

Номер емкости	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч
1	10
2	100
3	100
4	1 000
5	10
6	10
7	100

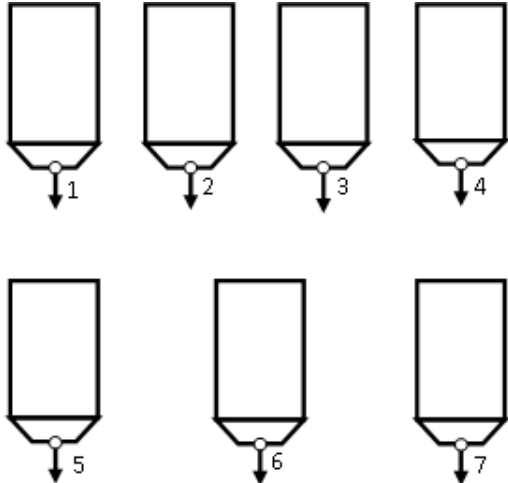


Рис. 2. Система емкостей со сливом воды  
Fig. 2. System of tanks with water drain

Таблица 4. Координаты и статистический вес точек  
Table 4. Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	$x_i$ , м	$y_i$ , м	Статистический вес точки, $\omega_i$
1	15	0	0,1
2	15	2	1
3	15	4	1
4	15	6	10
5	4	0	0,1
6	4	3	0,1
7	4	6	1

В указанной системе емкостей гидравлическое сопротивление будет минимальным, если минимально суммарное расстояние между главным водостоком и точками выхода воды из емкостей (с учетом значимости каждой емкости). Наилучшее положение водопровода можно найти методом наименьших квадратов.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  рассчитаем по уравнениям (4) и (5):  $a = 0,018595$ ;  $b = 5,17562$ . Уравнение, описывающее положение водостока, имеет вид:

$$y = 0,018595 \cdot x + 5,17562. \quad (9)$$

В соответствии с уравнением (9) нанесем линию на рис. 3, поменяв оси местами.

Как видно главный водопровод должен быть вертикально расположен между емкостями № 3 и 4, а также между емкостями № 6 и 7 (см. рис. 3). Водопровод расположен близко к емкости № 4, поскольку точка (т. е. емкость № 4) обладает большим статистическим весом. Это позволит увеличить пропускную способность всей системы по воде.

Выполнен расчет гидравлического сопротивления (потерь давления на трение) для двух вариантов схем водостока: без учета статистического веса аппарата и с учетом по уравнению (8). Диаметр основного водостока принимался равным 0,4 м, а боковых ответвлений 0,2 м. Установлено, что суммарное со-

противление трения в водостоке, рассчитанное без учета статистического веса, составит  $\Delta p_1 = 1\,856$  Па, а во втором варианте  $\Delta p_2 = 1\,668$  Па. Таким образом, гидравлическое сопротивление водостока снизится на 10 % и, как следствие, повысится его пропускная способность.

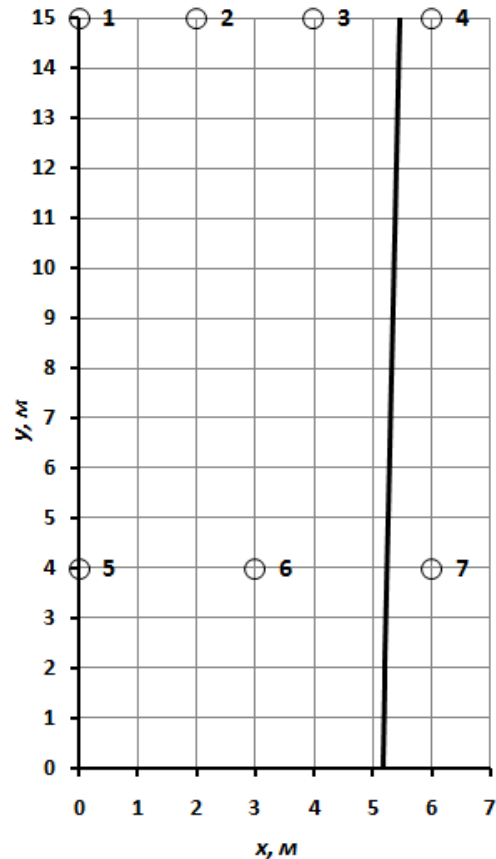


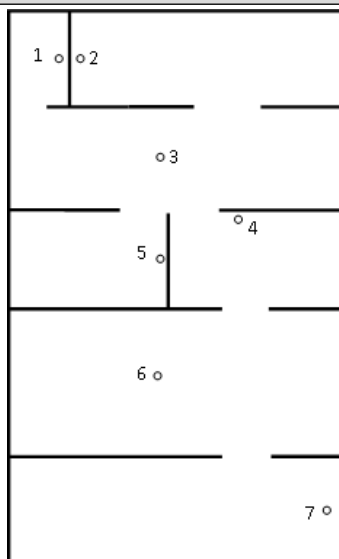
Рис. 3. К определению наилучшего расположения водопровода:

линия – водопровод; точки – место истечения воды из соответствующей емкости

Fig. 3. To determine the best location of the water supply system:

line – water supply system; points – the place where water flows out of the corresponding container

Рассмотренный метод анализа продуктивен также при разработке системы вентиляции промышленного производства. Рассмотрим промышленный цех, состоящий из семи производственных помещений (рис. 4). Система приточной вентиляции должна подавать свежий воздух в каждое помещение с разным расходом. Места подачи свежего воздуха в помещениях обозначены точками. Необходимо найти наилучшее расположение главного воздухопровода, при котором суммарная длина главного воздухопровода и боковых ответвлений минимальна. Это позволит снизить гидравлическое сопротивление воздухопровода и затраты мощности на подачу воздуха.



**Рис. 4.** План промышленного цеха (точками указаны места подачи воздуха)

**Fig. 4.** Plan of an industrial workshop (points indicate the places of air supply)

Далее приведены расходы вентиляционного воздуха в каждом помещении (табл. 5).

**Таблица 5.** Сведения о расходе воздуха  
**Table 5.** Information on air consumption

Номер помещения	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч
1	300
2	240
3	60
4	60
5	60
6	600
7	240

В табл. 6 сведены координаты и статистический вес всех точек. Расположение осей координат выбираем произвольно. Примем, что при расходе воздуха 60 м<sup>3</sup>/ч статистический вес точки равен 1.

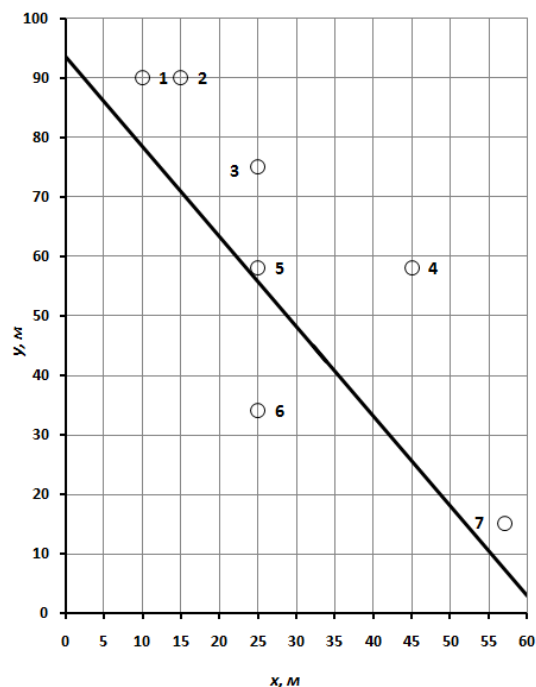
**Таблица 6.** Координаты и статистический вес точек  
**Table 6.** Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес точки, $\omega_i$
1	10	90	5
2	15	90	4
3	25	75	1
4	45	58	1
5	25	58	1
6	25	34	10
7	57	15	4

Коэффициенты:  $a = -1,5133$ ;  $b = 93,63783$ . Уравнение, описывающее положение воздуховода, имеет вид:

$$y = -1,5133 \cdot x + 93,63783 \quad (9)$$

Показано наилучшее расположение главного воздуховода в цехе (рис. 5). От главного воздуховода к каждой точке воздух поступает по рукавам (на рисунке не показаны).



**Рис. 5.** Наилучшее расположение воздуховода: линия – главный воздуховод

**Fig. 5.** Best air duct location: line – main air duct

Выполнен расчет потерь давления на трение для двух вариантов схем воздуховода: без учета статистического веса и с его учетом по уравнению (8). Диаметр основного воздуховода принимался равным 0,3 м, а боковых ответвлений 0,2 м. Установлено, что суммарное сопротивление трения в воздуховоде, рассчитанном без учета статистического веса, составит  $\Delta p_1 = 96,1$  Па, а во втором варианте  $\Delta p_2 = 83,6$  Па. Таким образом, гидравлическое сопротивление воздуховода снизится на 13 % и, как следствие, повысится его пропускная способность.

В данном случае метод наименьших квадратов позволяет обеспечить подачу воздуха в промышленные помещения с минимальными затратами мощности.

Важной задачей является повышение безопасности обслуживающего персонала на производстве, снижение травматизма и числа случаев профессиональных заболеваний [14–17]. В связи с этим необходимо минимизировать время пребывания обслуживающего персонала на производстве во внеурочное время и обеспечить своевременную эвакуацию персонала в случае аварии. С данной точки зрения рассмотрим предприятие, состоящее из восьми цехов (рис. 6). Территория завода в плане представля-

ет собой квадрат 1 000×1 000 м. Координаты центральной точки каждого цеха и число работников в каждом цехе приведены (табл. 7).

**Таблица 7.** Координаты и статистический вес точек  
**Table 7.** Coordinates and statistical weight of points

Номер цеха, $i$	$x_i, м$	$y_i, м$	Число работников, $N_i, чел.$	Статистический вес цеха, $\omega_i$
1	93	750	100	1,00
2	150	240	459	4,59
3	343	850	210	2,10
4	467	302	623	6,23
5	604	742	327	3,27
6	799	558	550	5,50
7	800	220	122	1,22
8	900	830	1 020	10,20
$\Sigma$	4 156	4 492	3 411	34,11

С целью повышения безопасности работы на производстве необходимо с учетом статистического веса каждого цеха определить наилучшее расположение двух пропускных пунктов и пешеходной дороги для работников на территории завода.

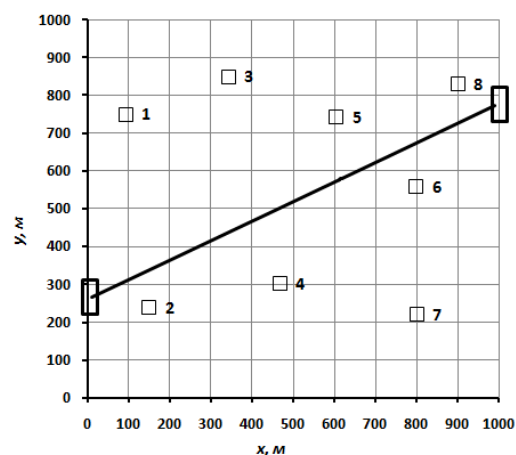
Наилучшим расположением двух пропускных пунктов на территорию завода для работников будет такое расположение, при котором суммарный путь работников от пропускного пункта до своих цехов будет минимальным. Данную задачу решим методом наименьших квадратов с учетом статистического веса каждого цеха. Статистический вес цеха зависит от числа работников в цехе. В цехе № 1 работает 100 чел., поэтому примем статистический вес этого цеха равным  $\omega_1 = 1$  (см. табл. 7).

Разработаем план расположения центральных точек цехов на территории предприятия в соответствии с координатами (рис. 6). Далее по уравнениям (4) и (5), используя данные (см. табл. 7), рассчитаем коэффициенты  $a$  и  $b$ :  $a = 0,51898$ ;  $b = 260,3923$ . Уравнение, описывающее координаты главной пешеходной дороги на территории завода и, соответственно, расположение двух пропускных пунктов, примет вид

$$y = 0,51898 \cdot x + 260,3923 . \quad (10)$$

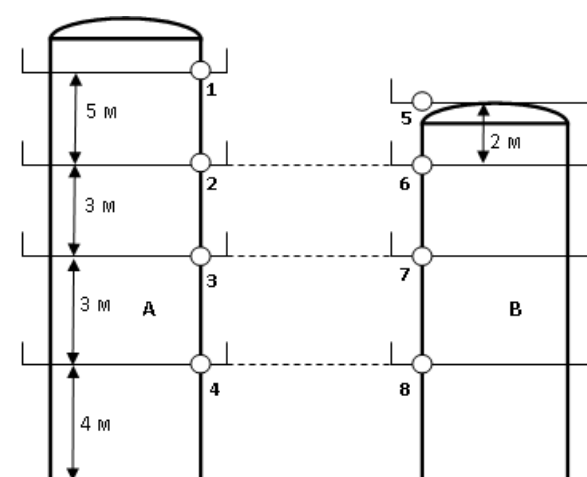
По уравнению (10) нанесем линию, соответствующую наилучшему расположению дороги, на план завода (рис. 6). Координаты пропускных пунктов составят: пункт № 1 ( $x = 0 м$ ;  $y = 260 м$ ); пункт № 2 ( $x = 1 000 м$ ;  $y = 779 м$ ).

Такое расположение пропускных пунктов и пешеходной дороги позволит минимизировать время пребывания персонала на производстве после окончания смены, снизить время эвакуации в случае аварии и, как следствие, повысить безопасность производства.



**Рис. 6.** Схематичный план химического завода:  
□ – центр цеха; — – наилучшая автомобильная дорога;  
цифры соответствуют номеру цеха  
**Fig. 6.** Schematic plan of a chemical plant:  
□ – center of the shop; — – the best automobile road;  
the numbers correspond to the workshop number

Безопасность персонала на промышленном производстве может быть повышена при тщательном предварительном подборе маршрутов перемещения работников по территории объекта [18–20]. Промышленная установка состоит из двух вертикальных цилиндрических аппаратов  $A$  и  $B$ , имеющих высоту 12 и 10 м соответственно (рис. 7). Расстояние между аппаратами составляет 6 м. На каждом аппарате есть площадки для ремонтно-механического обслуживания и отбора проб сред и атмосферного воздуха. Площадки обоих аппаратов, находящиеся на одном и том же уровне, соединены горизонтальными переходами. Расположение площадок по высоте аппаратов и нумерация площадок указаны (рис. 7).



**Рис. 7.** Промышленные аппараты с площадками для обслуживания  
**Fig. 7.** Industrial apparatus with service platforms

Необходимо определить наилучшее расположение единственной подъемной лестницы на площадке, если каждая площадка характеризуется своей частотой посещения обслуживающим персоналом (табл. 8).

**Таблица 8.** Сведения о посещаемости площадок  
**Table 8.** Information about attendance of service platforms

Номер площадки	Число посещений в сутки
1	6
2	6
3	1
4	10
5	1
6	1
7	2
8	1

Место входа на каждую площадку (см. рис. 7) обозначим пронумерованными точками. Номер точки совпадает с номером площадки. Эти точки нанесем на систему координат. Ось  $ox$  проходит по уровню земли, а ось  $oy$  соответствует стенке аппарата  $A$ . Статистический вес каждой точки равен частоте посещений персоналом соответствующей площадки. Координаты и статистический вес каждой точки занесем в (табл. 9).

**Таблица 9.** Координаты и статистический вес точек  
**Table 9.** Coordinates and statistical weight of points

Номер точки	$x_i, м$	$y_i, м$	Статистический вес точки, $\omega_i$
1	15	0	6
2	10	0	6
3	7	0	1
4	4	0	10
5	12	6	1
6	10	6	1
7	7	6	2
8	4	6	1

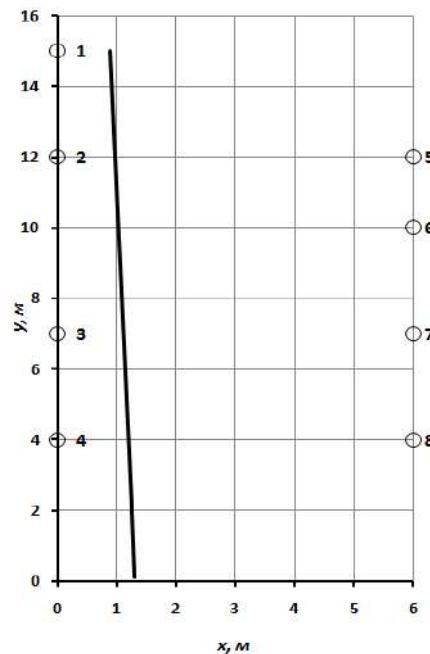
Наилучшее положение подъемной лестницы будет соответствовать линии, для которой сумма расстояний до всех точек будет минимальна. Это позволит снизить время обслуживания аппаратов и время пребывания персонала в опасной зоне. Решим задачу методом наименьших квадратов с учетом статистического веса каждой точки.

По уравнениям (4) и (5), используя данные (см. табл. 9), рассчитаем коэффициенты  $a$  и  $b$ :  $a = -$

$0,02726$ ;  $b = 1,30216$ . Уравнение, описывающее положение лестницы для подъема на площадке, имеет вид:

$$y = -0,02726 \cdot x + 1,30216. \quad (11)$$

В соответствии с уравнением (11) нанесем линию (рис. 8), поменяв оси местами.



**Рис. 8.** Построение наилучшей линии, соответствующей положению лестницы  
**Fig. 8.** Constructing the best line corresponding to the position of the stairs

Положение линии (см. рис. 8) соответствует наилучшему положению лестницы для подъема на площадке. Видно, что подъемную лестницу необходимо расположить приблизительно на расстоянии 1 м от аппарата  $A$  и на расстоянии 5 м от аппарата  $B$ . Такое положение лестницы объясняется большой посещаемостью площадок 1, 2 и 4. Расчеты показывают, что путь и, как следствие, время пребывания рабочего в опасной зоне в результате оптимизации сократится на 43 %.

### Заключение

Таким образом, использование метода наименьших квадратов с учетом значимости (статистического веса) объектов позволяет минимизировать гидравлические и тепловые потери на производстве, увеличить производительность оборудования, а также повысить безопасность и надежность эксплуатации объектов.

### Список литературы

1. Хилл П. Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973, 263 с.
2. Gaochen Cui, Qing-Shan Jia, Xiaohong Guan, Qing Liuc. Data-driven computation of natural gas pipeline network hydraulics // Results in Control and Optimization. Volume 1, December 2020, 100004.



3. Eric Machorro, Jichun Li, Monika Neda, Pengtao Sun, Hongtao Yang. Recent advances in computational mathematics and applications // *Results in Applied Mathematics*. Volume 8, November 2020, 100112.
4. Jensen H.A., Jerez D.J. A stochastic framework for hydraulic performance assessment of complex water distribution networks // *Probabilistic Engineering Mechanics*. Vol. 60, April 2020, 103029.
5. Yusupbekov N.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of Cloud Technologies for Optimization of Complex Processes of Industrial Enterprises // *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018*. Pp. 852–858.
6. Strel'tsova E., Borodin A., Yakovenko I., Sokira T., Bizhanova K. Information management system of industrial enterprise in conditions of digitalization // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Vol. 10. Iss. 01, January 2019. Pp. 559–575.
7. Сквайрс Дж. Практическая физика. М., 1971, 247 с.
8. Коломиец Л.В., Поникурова Н.Ю. Метод наименьших квадратов. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.
9. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1978. 319 с.
10. Лебедева О.А., Гозбенко В.Е., Пыхалов А.А. Мухопад Ю.Ф. Сравнительный анализ методов решения транспортных задач при оптимальном планировании перевозочного процесса // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020. № 3(67). С. 134–139.
11. Полтавская Ю.О. Оптимизация транспортной сети на основе минимума общих затрат на доставку грузов // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2019. № 13. С. 178–183.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 753 с.
13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Альянс, 2010, 575 с.
14. Струченков В.И. Дискретная оптимизация. Модели, методы, алгоритмы решения прикладных задач. Москва: СОЛОН-Пр., 2016. 192 с.
15. Павлов В.П. Карасев Г.Н. Дорожно-строительные машины. Системное проектирование, моделирование, оптимизация. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 240 с.
16. Островский Г.М., Волин Ю.М. Методы глобальной оптимизации сложных систем. Москва: ИД МИСиС, 2005. 105 с.
17. Бабеньшев С.В., Матеров Е.Н. Методы оптимизации. Железнодорожники: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. 134 с.
18. Шиплюк А.Н. Методы оптимизации в задачах аэродинамики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 107 с.
19. Золотарев А.А. Методы оптимизации распределительных процессов / А.А. Золотарев. Москва: Инфра-Инженерия, 2014. 160 с.
20. Авдюнин Е.Г. Моделирование и оптимизация промышленных теплоэнергетических установок. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019.

### References

1. Hill P. *Nauka i iskusstvo proektirovaniya* [Science and art of design]. Moscow: Mir Publ., 1973, 263 p.
2. Cui G., Jia Q., Guan X., Liuc Q. Data-driven computation of natural gas pipeline network hydraulics // *Results in Control and Optimization*, Volume 1, December 2020, 100004.
3. Machorro E., Li J., Neda M., Sun P., Yang H. Recent advances in computational mathematics and applications // *Results in Applied Mathematics*, Vol. 8, November 2020, 100112.
4. Jensen H.A., Jerez D.J. A stochastic framework for hydraulic performance assessment of complex water distribution networks // *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 60, April 2020, 103029.
5. Yusupbekov N.R., Adilov F.T., Ivanyan A.I. Application of Cloud Technologies for Optimization of Complex Processes of Industrial Enterprises // *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018*. Pp. 852–858.
6. Strel'tsova E., Borodin A., Yakovenko I., Sokira T., Bizhanova K. Information management system of industrial enterprise in conditions of digitalization // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Vol. 10. Iss. 01, January 2019. Pp. 559–575.
7. Skvairs Dzh. *Prakticheskaya fizika* [Practical physics]. Moscow, 1971, 247 p.
8. Kolomiets L.V., Ponikarova N.Yu. *Metod naimen'shikh kvadratov* [Least square method]. Samara: Samara university Publ., 2017. 32 p.
9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Optimizatsiya eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Optimization of experiment in chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 319 p.
10. Lebedeva O.A., Gozbenko V.E., Pykhalov A.A. Muxopad Yu.F. *Sravnitel'nyi analiz metodov resheniya transportnykh zadach pri optimal'nom planirovaniy perevochnogo processa* [Comparative analysis of methods of solving transport problems with optimal planning of the transportation process] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2020. No. 3(67). Pp. 134–139.
11. Poltavskaya Yu.O. *Optimizatsiya transportnoi seti na osnove minimuma obshchih zatrat na dostavku грузов* [Optimization of the transport network based on the minimum total shipping costs] // *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Angarsk State Technical University Bulletin], 2019. No. 13. Pp. 178–183.
12. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1973. 753 p.

13. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskoi tekhnologii [Examples and problems for the course of processes and devices in chemical technology]. Al'yans, 2010, 575 p.
14. Struchenkov V.I. Diskretnaya optimizatsiya. Modeli, metody, algoritmy resheniya prikladnykh zadach [Discrete optimization. Models, methods, algorithms of solving applied problems]. Moscow: SOLON-Pr. Publ., 2016. 192 p.
15. Pavlov V.P., Karasyov G.N. Dorozhno-stroitel'nye mashiny. Sistemnoe proektirovanie, modelirovanie, optimizatsiya [Road construction machines. System design, modeling, optimization]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-ty Publ., 2011. 240 p.
16. Ostrovskii G.M., Volin Yu.M. Metody global'noi optimizatsii slozhnykh system [Complex systems' optimization methods]. Moscow: ID MISiS Publ., 2005. 105 p.
17. Babenyshev S.V., Matyurov E.N. Metody optimizatsii [Optimization methods]. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. 134 p.
18. Shpiyuk A.N. Metody optimizatsii v zadachakh aerogazodinamiki [Optimization methods in problems of aerogasdynamics]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2014. 107 p.
19. Zolotarev A.A. Metody optimizatsii raspredelitel'nykh protsessov [Methods of optimizing distribution processes]. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ., 2014. 160 p.
20. Avdyunin E.G. Modelirovanie i optimizatsiya promyshlennykh teploenergeticheskikh ustanovok [Modeling and optimization of industrial heat and power plants]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya Publ., 2019.

#### Информация об авторах

**Бальчугов Алексей Валерьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, e-mail: balchug@mail.ru

**Гозбенко Валерий Ерофеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

#### Information about the authors

**Aleksei V. Balchugov** – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Machines and Apparatuses of Chemical Production, Angarsk State Technical University, e-mail: balchug@mail.ru

**Valerii E. Gozbenko** – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, e-mail: vgozbenko@yandex.ru