



Фокусирующая система лазера

И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич,
НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь

Представлена конструкция оптической системы для фокусировки лазерного пучка с предельно малым размером пятна в широком диапазоне дистанций от 50 м до 2 км. Трудности с управлением лазерным пучком и его фокусировкой снижены за счет использования схемы с расширителем лазерного пучка.

Ключевые слова: фокусировка лазерного пучка, коллиматор, расширитель лазерного пучка, фриформ

Статья получена: 10.05.2023

Статья принята: 24.07.2023

ВВЕДЕНИЕ

Оптические системы фокусировки лазерного пучка обеспечивают эффективность применения оптико-электронных систем в актуальных контурах связи и управления. Оптическая система целеуказания должна создавать на объекте наблюдения лазерное пятно предельно малого размера с удовлетворительной коррекцией aberrаций, величина которых особенно важна на больших дистанциях.

В первом приближении величину лазерного пятна можно представить как сумму геометрического и aberrационного пятен:

$$\phi = \phi_a + \phi_r.$$

Геометрическое пятно ϕ_r вычисляется по формуле:

$$\phi_r = \phi_b \cdot D / f_k,$$

где ϕ_b – диаметр волокна лазера; D – дистанция; f_k – фокусное расстояние коллиматора.

Для выбранного лазера и заданного диапазона дистанций размер геометрического пятна будет зависеть только от фокусного расстояния коллиматора, величина которого, в свою очередь, ограничивается возможностью изготовления линз большого диаметра, габаритами механики и кон-

Laser Focusing System

I. P. Shishkin, A. P. Schkadarevich, STC "LEMT" BELOMO,
Minsk, Republic of Belarus

The design of an optical system for focusing a laser beam with an extremely small spot size in a wide range of distances from 50 m to 2 km is presented. Difficulties with controlling the laser beam and focusing it are reduced by using a circuit with a laser beam expander.

Keywords: laser beam focusing, collimator, laser beam expander, freeform

Article received on May 10, 2023

Article accepted on July 24, 2023

INTRODUCTION

Optical systems for focusing a laser beam ensure the efficiency of the use of optical-electronic systems in actual communication and control loops. The optical target designation system should create an extremely small laser spot on the object of observation with a satisfactory correction of aberrations, the magnitude of which is especially important at long distances.

The value of the laser spot in the first approximation can be represented as the sum of geometric and aberration spots:

$$\phi = \phi_a + \phi_r.$$

The geometric spot ϕ_r is calculated by the formula:

$$\phi_r = \phi_b \cdot D / f_k,$$

where ϕ_b – is the diameter of the laser fiber; D – is the distance; f_k – is the focal length of the collimator.

For the selected laser and a given range of distances, the size of the geometric spot will depend only on the focal length of the collimator, the value of which, in turn, is limited by the possibility of manufacturing large-diameter lenses, the dimensions of the mechanics and the focusing mechanism design.

The aberration spot will be determined by the level of aberration correction in the optical system. The optimal solution for creating a focusing laser system is a 2-lens collimator circuit in which the lenses are separated by an air gap. By optimizing the 4 lens radii, it is possible to achieve satisfactory aberration correction and obtain



струкцией механизма фокусировки. Аберрационное пятно будет определяться уровнем исправления аберраций в оптической системе.

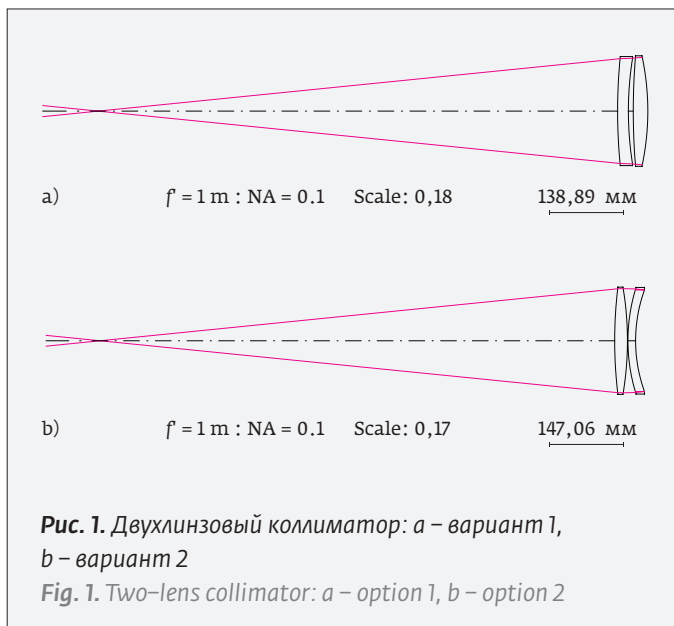
Оптимальным решением для создания фокусирующей системы лазера является 2-линзовая схема коллиматора, в которой линзы разделены воздушным промежутком. С помощью оптимизации 4-х радиусов линз можно добиться удовлетворительной коррекции аберраций и получить предельно малое аберрационное пятно, величина которого в особенности важна на больших дистанциях, когда геометрическое пятно максимально. Фокусировка в коллиматоре осуществляется с помощью подвижки выходного торца волокна лазера.

ДВУХЛИНЗОВЫЙ КОЛЛИМАТОР

В двухлинзовом коллиматоре форма и взаимное расположение линз оказывают существенное влияние на коррекцию аберраций. На рис. 1 представлены варианты конструкции коллиматора с фокусным расстоянием 1 м для лазера с углом расходимости $\theta=100$ мрад (числовая апертура $N_a=0,1$).

На рис. 2 показаны графики лучевых аберраций коллиматоров для осевой точки на бесконечности. При сравнении графиков видно, что аберрации во втором варианте в 10 раз меньше, чем в первом.

Диаметры пятен в размерности миллиметров для лазера с диаметром волокна 25 мкм и коллиматора с фокусным расстоянием 1 м на различных дистанциях приведены в табл. 1.



an extremely small aberration spot, the size of which is especially important at long distances when the geometric spot is maximum. Focusing in the collimator is carried out by moving the output end of the laser fiber.

TWO-LENS COLLIMATOR

In a two-lens collimator, the shape and relative position of the lenses have a significant impact on the correction of aberrations. Fig.1 shows the design options of a collimator with a focal length of 1 m for a laser with a divergence angle $\theta=100$ Mrad (numerical aperture $N_a=0.1$).

Fig. 2 shows ray aberrations plots of collimators for the axial point at infinity. The plots comparison demonstrate that the ray aberrations in the second variant are 10 times less than in the first one.

Spot diameters in mm for a laser with a fiber diameter of 25 μm and a collimator with a focal length of 1m at various distances are shown in Table 1.

BEAM EXPANDER

The larger focus of the collimator, the smaller geometric spot, but at the same time the dimensions of the structure grow, which means that difficulties arise with controlling the laser beam and focusing it. The scheme

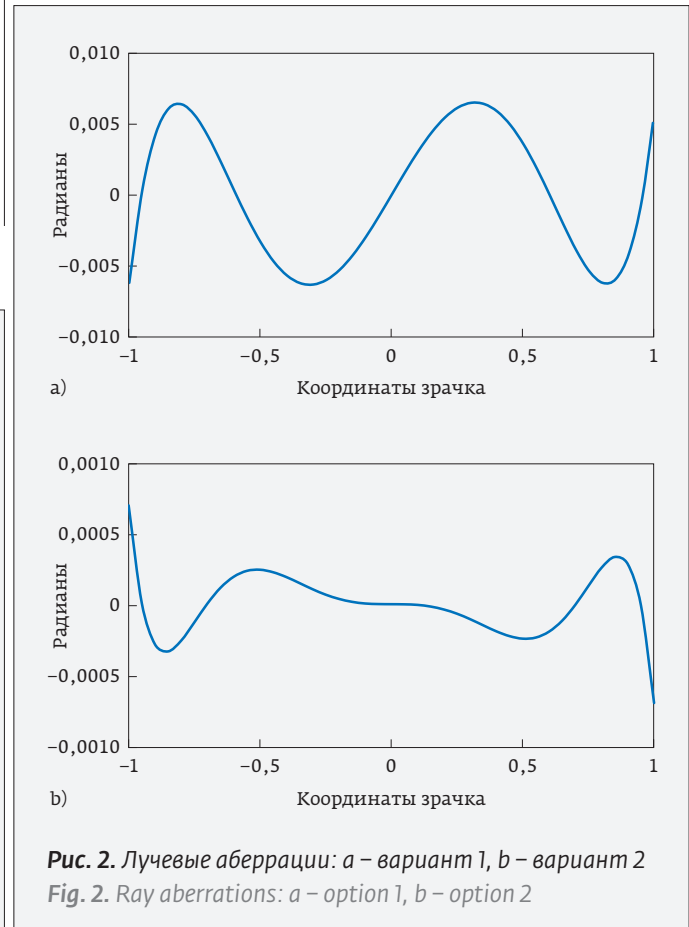


Таблица 1. Зависимость диаметра суммарного лазерного пятна от дистанции

Table 1. Dependence of the total laser spot diameter on the distance

Дистанция, м Distance, m	Геометрическое пятно, мм Geometric spot, mm	Аберрационное пятно, мм Aberration spot, mm		Суммарное лазерное пятно, мм Total laser spot, mm	
	ϕ_r	ϕ_a		$\phi = \phi_a + \phi_r$	
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
50	1,25	2	4	3,25	5,25
100	2,5	4	1	7,5	3,5
200	5	6	1	11	6
500	12,5	8	1	20,5	13,5
1000	25	16	2	41	27
2000	50	32	2	82	52

РАСШИРИТЕЛЬ ПУЧКА

Чем больше фокус коллиматора, тем меньше геометрическое пятно, но при этом растут габариты конструкции, а значит, возникают трудности с управлением лазерным пучком и его фокусировкой. Схема с расширителем лазерного пучка (рис. 3) позволяет существенно сократить длину коллиматора [1]. Одновременно упрощается механизм фокусировки за счет перемещения отрицательной линзы в расширителе пучка, который по сути является телескопом Галилея.

Конструкция коллиматора на рис. 3 включает коллимирующую линзу с фокусом 200 мм и телескоп с увеличением 5×. Таким образом, эквивалентный фокус коллиматора составит 1 м, а длина сократится практически вдвое. Для уменьшения количества линз, выходная линза телескопа сде-

with a laser beam expander, which is shown in Fig. 3, allows to significantly reduce the length of the collimator [1]. At the same time, the focusing mechanism is simplified by moving the negative lens in the beam expander, which is essentially a Galileo telescope.

The design of the collimator in Fig. 3 includes a collimating lens with a focus of 200 mm and a telescope with 5× magnification. Thus, the equivalent focus of the collimator will be 1m, and the length will be reduced by almost half. To reduce the number of lenses, the output lens of the telescope is made aspherical. If a breaking mirror is installed in parallel, then this solution can also be used to combine beams of several lasers (at least two).

MIRROR COLLIMATOR

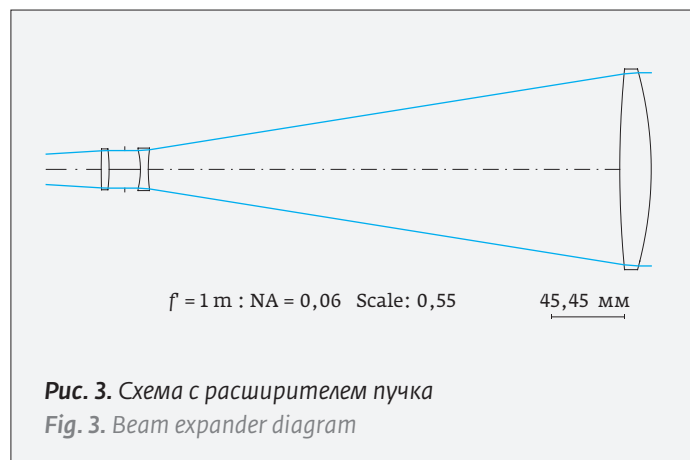
If you use mirrors in the design of the collimator, then you can reduce its size as much as possible. Fig. 4 shows a collimator constructed according to the well-known classical scheme of a two-mirror astronomical lens, in which a large mirror is parabolic (Newton's type), hyperbolic (Cassagrain's type) or ellipsoidal (Gregory's type). The small mirror in all schemes is flat. In the proposed scheme, the large mirror is spherical, and the small mirror is parabolic.

The disadvantage of a two-mirror collimator is the shielding of the central zone of the entrance pupil.

The effective area of the entrance pupil during the reverse movement can be calculated from the difference in the area of the mirrors:

$$S_{\text{эфф}} = S_2 - S_1 = \sqrt{\frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4}},$$

where S_1 и S_2 - area of the mirrors, D_1 и D_2 - their diameters.



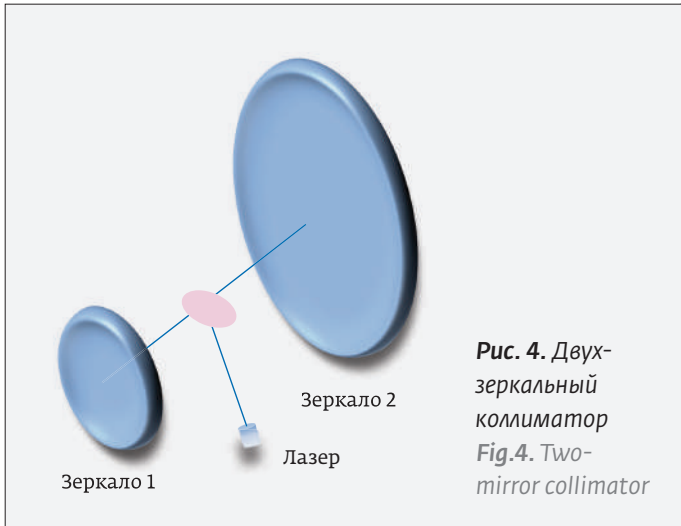


Таблица 2. Примеры соотношений радиуса большого зеркала R_2 , диаметра малого зеркала D_1 , габаритов и абберационного пятна коллиматора (фокусное расстояние 1 м, диаметр большого зеркала $D_2=200$ мм)

Table. 2. Examples of the ratios of the radius of the large mirror R_2 , the diameter of the small mirror D_1 , the dimensions and aberration spot of the collimator (focal length 1 m, diameter of the large mirror $D_2=200$ mm)

R_2 , м	D_1 , мм	Длина, мм	Точка, μ
1	70	333	2
0,7	35	273	4
0,7	20	333	8
0,6	15	230	25

лана асферической. Если установить в параллельном ходе ломающее зеркало, то это решение можно использовать и для объединения пучков нескольких лазеров (по крайней мере двух).

ЗЕРКАЛЬНЫЙ КОЛЛИМАТОР

Если применить зеркала в конструкции коллиматора, то можно максимально сократить его размеры. На рис. 4 представлен коллиматор, построенный по известной классической схеме двухзеркального астрономического объектива, в котором большое зеркало – параболическое (схема Ньютона), гиперболическое (схема Кассегрена) или эллипсоидальное (схема Грегори). Малое зеркало во всех схемах – плоское. В предлагаемой схеме большое зеркало – сферическое, а малое зеркало – параболическое.

Недостатком двухзеркального коллиматора является экранирование центральной зоны входного зрачка.

Эффективную площадь входного зрачка в обратном ходе можно вычислить через разницу площади зеркал:

$$S_{эфф} = S_2 - S_1 = \sqrt{\frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4}}$$

где S_1 и S_2 – площадь зеркал; D_1 и D_2 – их диаметры. Площадь малого зеркала определяется как величиной вогнутого радиуса большого зеркала R_2 (чем меньше радиус большого зеркала, тем меньше площадь малого зеркала и больше эффективная площадь входного зрачка), так и размером абберационного пятна.

В табл. 2 приведены примеры соотношений радиуса большого зеркала R_2 , диаметра малого

The area of a small mirror is determined both by the size of the concave radius of the large mirror R_2 (the smaller the radius of the large mirror, the smaller the area of the small mirror and the larger the effective area of the entrance pupil) and the size of the aberration spot.

Table 2 shows examples of the ratios of the radius of the large mirror R_2 , the diameter of the small mirror D_1 , the dimensions and aberration spot of the collimator with a focal length of 1m and the diameter of the large mirror $D_2=200$ mm. Fig.5 shows the dependence of the spot size on the mirror diameter D_1 .

Fig.6 shows an example of a 3-mirror cascade collimator circuit. All mirrors have the shape of an off-axis aspheric (freeform), which makes it possible to ensure

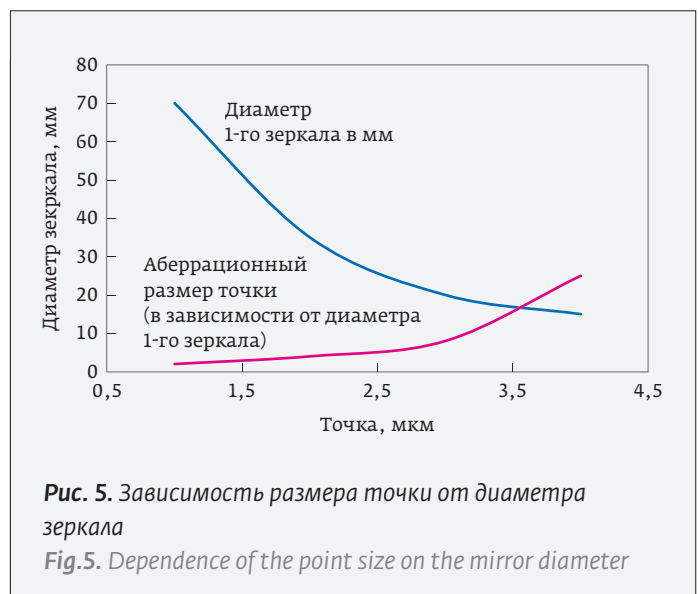


Рис. 5. Зависимость размера точки от диаметра зеркала

Fig.5. Dependence of the point size on the mirror diameter

зеркала D_1 , габаритов и абберационного пятна коллиматора с фокусным расстоянием 1 м и диаметром большого зеркала $D_2=200$ мм. На рис. 5 показана зависимость размера точки от диаметра зеркала D_1 .

На рис. 6 показан пример трехзеркальной каскадной схемы коллиматора. Все зеркала имеют форму внеосевой асферики (фриформ), что позволяет обеспечить минимальный размер выходного пятна лазера без экранирования центральной зоны входного зрачка [2]. Световой диаметр выходного зеркала 3 и длина коллиматора (в плоскости рисунка) для эквивалентного фокуса 1 м составляет ~200 мм.

Работу 3х-зеркального коллиматора при фокусировке на бесконечность можно описать следующим образом. Пучок лазера с расходимостью 100 мрад попадает на зеркало 1 с фокусным расстоянием 200 мм, затем коллимированный пучок диаметром 40 мм с помощью зеркального телескопа (зеркало 2 и зеркало 3) с увеличением 5× преобразуется в коллимированный пучок диаметром 200 мм. Фокусировка на различные дистанции (50 м – 2 км) осуществляется при помощи подвижки выходного торца волокна лазера в пределах 3–20 мм (в зависимости от конкретного расчета).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена оптическая система целеуказания, которая создает на объекте наблюдения лазерное пятно предельно малого размера на дистанциях до 2000 метров. Расчеты показали, что выбор оптимальной конструкции коллиматора с использованием линз или зеркал с аферическими поверхностями (фриформ) позволяет создать компактную систему фокусировки, обеспечивающую минимальный размер лазерного пятна в широком диапазоне дистанций.

REFERENCES

1. Patent RU2167444. 20.05.2001. *A telescopic system for focusing laser radiation* / Potapova N. I., Tsvetkov A. D.
2. Caron J., Baumer S. *Progress in aberration theory fo freeform off-axis mirror systems*. Proceedings International Optical Design Conference – 2021 (IODS-2021). 2021; 120780G. <https://doi.org/10.1117/12.2603625, 12078>.

ОБ АВТОРАХ

Шишкин Игорь Петрович, к. т. н., НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Шкадаревич Алексей Петрович, д. ф.-м. н., НТЦ «ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

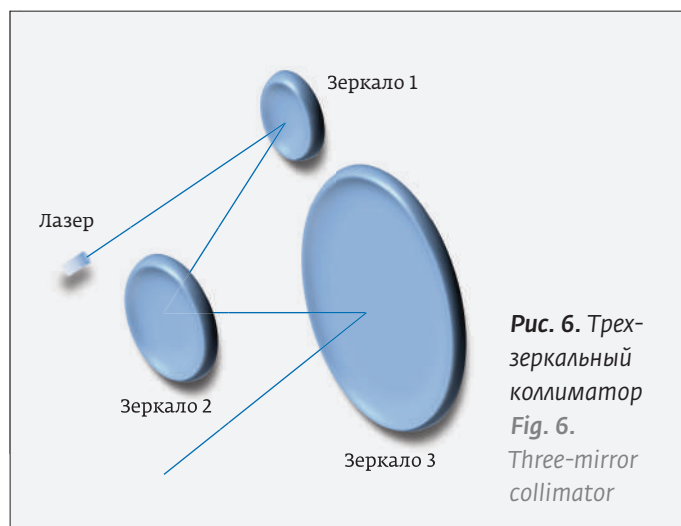


Рис. 6. Трехзеркальный коллиматор
Fig. 6. Three-mirror collimator

the minimum spot of the laser output without shielding the central zone of the entrance pupil. The working diameter of the output mirror 3 and the length of the collimator (in the plane of the figure) for an equivalent focus of 1m is ~200 mm.

The operation of a 3x-mirror collimator when focusing to infinity can be described as follows. A laser beam with 100mrad divergence angle of hits mirror 1 with a focal length of 200 mm, then a collimated beam of $\varnothing 40$ mm using a mirror telescope (mirror 2 and mirror 3) with 5× magnification is converted into a collimated beam of $\varnothing 200$ mm. Focusing at various distances (50 m - 2 km) is carried out by moving the output end of the laser fiber within 3–20 mm (depending on the specification).

CONCLUSION

An optical target designation system is proposed that creates an extremely small laser spot on the object of observation at distances up to 2000 meters. Calculations have shown that the choice of the optimal collimator design and the using lenses or mirrors with freeform shape allows to create a compact focusing system that ensures the minimum laser spot size for use within a wide range of distances.

AUTHORS

Shishkin Igor Petrovich, Cand.of Sc. (Eng.), STC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Shkadarevich Aleksey Petrovich, Dr. of Sc.(Phys.&Math.), STC "LEMT", BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.



Меняем жизнь к лучшему. Алкотестирование – работа без травм и происшествий

Профессиональное оборудование для алкотестирования на предприятиях может предотвратить несчастные случаи и спасти человеческие жизни – в этом убеждены в компании «Лазерные системы», где уже много лет производят алкорамки для промышленного применения и считают, что данное оборудование имеет глобальное влияние на экономику страны и меняет жизнь к лучшему.

Решение представляет собой современное эргономичное устройство, которое можно интегрировать в существующую на предприятии комплексную систему безопасности или установить автономно на проходной. Алкорамки «Лазерных систем» тестируют персонал в потоковом режиме с моментальной выдачей результата всего за одну секунду. Для сотрудника предприятия, не прошедшего тест на

проходной, турникет не откроется.

«Наши алкорамки созданы на основе уникальных алкотестеров, – рассказывает генеральный директор компании Дмитрий Васильев, – в основе действия которых лежит принцип лазерной оптической спектроскопии, – обратите внимание: без использования мундштуков. Это дает ряд преимуществ: вы просто выдыхаете в сторону устройства и через секунду получаете результат. Это значит, что на любом предприятии можно организовать 100%-й контроль на вход и на выход. Кроме того, бесконтактная технология тестирования алкорамок не предполагает использование мундштуков и траты на расходники».

Год назад в компании расширили модельный ряд алкорамок и запустили в серийное производство новые модели, оснащенные вставкой обогрева, которая позволяет за счет гиро-

идной структуры проводить тестирование на алкоголь при низких температурах. Это решение актуально для предприятий, где преобладает минусовая температура и сквозняки, например в шахтах.

Алкорамки также могут обладать разной пропускной способностью – от 15 до 25 человек в минуту – и подбираются индивидуально под предприятие в зависимости от проходимости на КПП и численности персонала. Правильно подобранное устройство позволяет полностью исключить очереди на проходной.

АО «Лазерные системы» приглашает на свой выставочный стенд на выставке российского форума «Микроэлектроника-2023» всех желающих, чтобы протестировать алкорамку и лично убедиться в быстродействии ее работы и точности измерений.

АЛКОЗАМОК П-02 НЕ ДОПУСТИТ НЕТРЕЗВОГО СОТРУДНИКА НА ПРЕДПРИЯТИЕ

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Алкозамок П-02 (Алкорамка) – бесконтактный экспресс-тестер с уникальной технологией моментального выявления алкоголя в выдохе. Устройство устанавливается на проходных предприятиях и обладает максимальной пропускной способностью.

Выполнить тестирование с помощью Алкорамки просто: приложить карту к считывателю, сделать выдох, дождаться результата и пройти.

25

ЧЕЛОВЕК В МИНУТУ

Алкорамка измеряет в потоковом режиме с высокой пропускной способностью до 25 человек в минуту

1

СЕКUNDA

Всего 1 секунду занимает тест на наличие алкогольного опьянения и ровно через 1 секунду устройство готово к новому тестированию

24/7

КРУГЛОСТОЧНАЯ РАБОТА

Устройство работает круглосуточно в автономном режиме. Автоматически срабатывает на выдох, обрабатывает измерения и реагирует на наличие паров этанола

7

ЛЕТ БЕСПЕРЕВОЙНОЙ РАБОТЫ

Алкорамка имеет максимально длительный срок эксплуатации и расширенную 2-х летнюю гарантию

5000

ПРЕДПРИЯТИЙ В РОССИИ И СНГ

Устройство Алкорамка уже сегодня обеспечивает безопасность более чем на 5000 предприятий, среди них: Газпром, Евраз, Мираторг, СУЭК, Росатом, Домодедово, Роснефть и др.

sales@lsystems.ru
alcoramca.ru

+7 (812) 612-02-88
lsystems.ru

