



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Мирсалихов К.М.

Казанский государственный энергетический университет,
Г. Казань, Россия

gribovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru, mirsalihovkm@gmail.com

Резюме: В ряде случаев, например, как средство верификации вариантных расчетов в среде ANSYS, требуется исследование траектории дымового факела в натуральных условиях. Одним из наиболее простых, удобных и дешевых способов определения траектории является ее фотографирование с дальнейшей расшифровкой фотоснимка. Так, например, вертикально стоящая дымовая труба, в том случае, если направление съемки фотоаппарата приподнято над горизонтом, а труба расположена не по центру снимка, на фотоснимке она выглядит наклонной. Угол, под который был установлен фотоаппарат, можно рассчитать по фотографии. Чем дальше расположен предмет, тем меньше места он занимает на снимке. Таким образом, чтобы рассчитать траекторию дымового факела по фотоснимку, нужно знать ориентацию главной оптической оси во время снимка и расстояние до плоскости снимка. **ЦЕЛЬ.** Разработка новой, более простой методики пересчета траектории дымового факела от дымовой трубы с использованием доступных карт Google для расчета исходных масштабов на фотографии. **МЕТОДИКА.** Позволяет проследить всю последовательность действий от определения координат точки съемки до пересчета на ортогональную плоскость координат выбранных точек границ факела на фотоснимке относительно источника выброса. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана новая методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку, точность которой проверена по известным размерам исходных объектов, и которая оказалась выше, чем применявшаяся для этих целей ранее.

Ключевые слова: дымовая труба, дымовой факел, траектория, фотоснимок, карты Google.

Благодарности: Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001

Для цитирования: Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Мирсалихов К.М. Определение траектории дымового факела с использованием спутниковых снимков // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 132-145. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.

DETERMINING THE TRAJECTORY OF A SMOKE FLAME USING SATELLITE IMAGES

Gribov AM., Chichirova ND., Mirsalikhov KM.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

gribovalmi@mail.ru, ndchichirova@mail.ru, mirsalihovkm@gmail.com

Abstract: In a number of cases, for example, when choosing the design of the exit part of a chimney, when taking into account the characteristics of the underlying surface and meteorological characteristics of the area, or as a means of verifying variant calculations in the ANSYS environment, a study of the trajectory of the smoke plume in natural conditions is required. One of the simplest, most convenient and cheapest ways to determine a trajectory is to photograph it and then decipher it. So, for example, a vertical chimney, if the direction of the camera is raised above the horizon, and the chimney is not located in the center of the photo, it looks inclined in the photo. This means that at the top of the image and at the bottom there are different horizontal

linear scales of the image. The angle at which the camera was installed can also be calculated from the photograph. In addition, the same vertical height interval occupies a smaller length in the upper part of the pipe and a larger one in the lower part. This means that in the upper part of the image and in the lower part there are different vertical linear scales of the image. It is also necessary to take into account the fact that objects of the same size have different sizes in the picture. The further away an object is located, the less space it takes up in the photo. Thus, in order to calculate the trajectory of a smoke plume from a photograph, we need to know the orientation of the main optical axis during the photograph and the distance to the photograph plane, which we choose perpendicular to the main optical axis and passing through the object, from which we can determine the initial average linear scales, and the direction smoke plume spread. **TARGET.** Development of a new, simpler method for recalculating the trajectory of a smoke plume from a chimney using available Google maps to calculate the original scales in a photograph. **METHODOLOGY** Allows you to trace the entire sequence of actions from determining the coordinates of the shooting point to recalculating the coordinates of the selected points of the torch boundaries in the photograph relative to the emission source onto an orthogonal plane. **RESULTS.** A new method for calculating the trajectory of a smoke plume from a single photograph has been developed, the accuracy of which was tested using known sizes in the original objects, and which turned out to be higher than that previously used for these purposes.

Key words: flue gas stack, smoke torch, trajectory, photograph, Google maps.

Acknowledgements: The results were obtained with financial support from the Ministry of Science and Higher Education «Study of processes in a hybrid power plant fuel cell - gas turbine» project code FZSW-2022-0001

For citation: Gribkov AM., Chichirova ND., Mirsalikhov KM. Determining the trajectory of a smoke flame using satellite images. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 132-145. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.

Введение (Introduction)

Одной из основных проблем при исследовании траектории дымового факела является переменная метеорологическая обстановка во время эксперимента. При использовании теодолитного визирования в силу специфики методики для фиксации одной траектории может потребоваться несколько минут, то есть при использовании данного метода получаем осредненные результаты за данный отрезок времени. Такая методика требует фиксации нескольких траекторий для получения осредненной. Для оценки исследования всей видимой части дымового факела одновременно, была разработана методика, основанная на определении траектории дымового факела при помощи фотоснимка. Для этого производится фотосъемка дымовой трубы и всей видимой части дымового факела. Для повышения точности результатов желательно располагаться как можно более перпендикулярно направлению движения дымового факела. При использовании данной методики может применяться любая современная фотокамера. Знание ее характеристик не требуется. Вся необходимая для расчета информация может быть получена по характеристикам дымовой трубы и из плана места съемки, полученного по спутниковому снимку.

Литературный обзор (Literature Review)

Исследования траектории распространения дымового факела начали проводиться в основном с 60-х годов прошлого столетия. При этом для регистрации положения дымового факела чаще всего применялось его фотографирование, а также определение его границ с помощью теодолита [1]. Так, например, Хэмфрис проводил теодолитные наблюдения за дымовым факелом от труб тепловых электростанций высотой 125 и 150 м до расстояний 2,5 км [2]. Обширный материал наблюдений за дымовым факелом в Швеции представлен в работе Брингфелта, где фотографировались факелы более, чем от 30 дымовых труб [3].

Попытки применения для этого наземной стереофотосъемки [4] и аэрофотосъемку [5] показали, что, несмотря на высокую стоимость таких экспериментов, они не дают заметного увеличения точности, так как при их анализе неизбежные погрешности в определении метеорологических данных, таких, как скорость ветра или температура воздуха в области распространения дымового факела значительно перекрывают погрешности в определении координат дымового факела [6].

Методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку с использованием теодолитных замеров в условиях видимости дымовой трубы приведена в [7]. Основные общепринятые методы оценки дисперсии примесей в атмосфере, в том числе и применительно к выбросам из дымовых труб ТЭС, приведены в [8]. Несмотря на то, что в настоящее время все более широко применяется CFD-моделирование при решении широкого круга задач, в т.ч. и определение влияния условий истечения дымовых газов в атмосферу, для надежного их решения требуется верификация применяемого программного обеспечения с помощью натурального эксперимента. Основным средством такого эксперимента является фотографирование дымового факела.

В настоящее время возникают задачи, в которых требуется определение траектории дымового факела. Так, например, в [9] проведено исследование траектории начального участка дымового факела при установке на трубе в районе устья двух соосных с трубой вентиляторов. Показано, что установка таких вентиляторов на относительно низкие дымовые трубы котельных позволяет интенсифицировать процессы разбавления дымовых газов в атмосфере и тем самым значительно уменьшить длину дымового факела с заданным уровнем концентрации примесей в нем.

В [10] с помощью универсальной программной системы анализа методом конечных элементов ANSYS проведено моделирование начального участка 4-ствольной дымовой трубы, где впервые был показан эффект взаимного сближения струй отдельных стволов за счет разрежения в центре объединенного факела, что приводит к более быстрому объединению дымовых струй отдельных стволов, чем считалось ранее.

Серия численных экспериментов с целью исследования влияния метеорологических условий на форму дымовых факелов от дымовых труб высотой 180 и 250 м. с учетом наличия в факеле твердых взвесей проведена в работе [11]. В результате были получены важные результаты для разработки мониторинговых исследований в районе оз. Байкал.

В работе [12] проводилось исследование траектории газового факела из дымовой трубы корабля для того, чтобы рассчитать возможность нагрева от него корабельных конструкций. Показано, что радиоэлектронная аппаратура может нагреваться дымовыми газами больше допустимых 70 °С. В качестве верификации разработанной методики расчета применялась тепловизионная съемка. Расшифровка тепловизионных снимков может проводиться аналогично расшифровке фотографических снимков.

В работе [13] исследовались траектории дымовых факелов Барнаульских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, имеющих дымовые трубы высотой от 100 до 230 м. Для анализа привлекались снимки с искусственного спутника земли, по которым оценивалось турбулентное состояние пограничного слоя атмосферы и поворот ветра с высотой. В рамках предложенных решений обратных задач предложено описание процесса распространения атмосферных примесей и с помощью численного моделирования были получены профили скорости ветра. В основу модели положены уравнения экмановского пограничного слоя. В результате получена метеорологическая информация для определения эффективной высоты выбросов в условиях реальной атмосферы. В [14] описана аналогичная работа, сделанная на базе Омских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5.

Исследование траектории дымового факела [15] позволили сделать важные выводы о том, что неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) по рассеиванию вредных выбросов для высотных источников не совпадают с такими же для низких источников и что направление ветра для высотных источников существенно отличается от направления ветра, определенного по уровню флюгера.

В [16] приведен обзор методик, по которым проектируются дымовые трубы и как на это влияют параметры, влияющие на рассеивание выбрасываемых примесей.

Материалы и методы (Materials and methods)

В условиях городской застройки основная часть дымовой трубы с расположенными на ней светофорными площадками как правило не видна, что затрудняет использование теодолита для определения исходных масштабов на фотоснимке. Избежать эти трудности позволяет использование спутниковых снимков для района фотографирования. Проверка с помощью теодолитных замеров показала, что для этого могут использоваться сервисы Яндекс Карты или Google Maps так как они позволяют определять расстояние между точками непосредственно на снимке с достаточной степенью точности и в то же время легко доступны.

На рисунке 1 схематично приведен спутниковый снимок места съемки. Направление главной оптической оси дает пересечение диагоналей снимка, (рис. 2), точка 0. Это направление может быть, по характерным особенностям попавшей в кадр местности, привязано к спутниковому снимку, (рис. 1).

На этом рисунке точка 1 – это точка съёмки, 2 – дымовая труба. Угол между направлением на трубу и направлением распространения дымового факела должен быть известен (угол 1-2-0). Плоскость снимка перпендикулярна главной оптической оси.

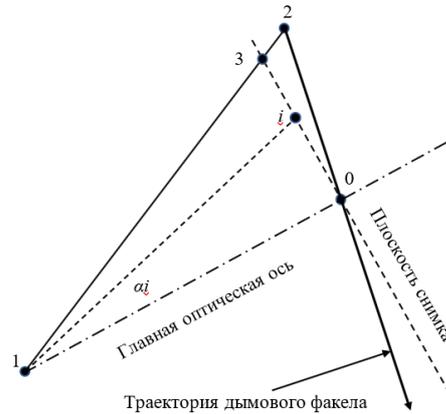


Рис. 1. Спутниковый снимок места съёмки Fig.1 Satellite image of the shooting location
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 приведена фотография дымового факела в полных границах снимка. По спутниковому снимку по характерным элементам местности определяем расстояние между точками 1 и 2 (обозначим его как L , м) и между точками 1 и 3 (обозначим его как mt , м), а также между точками 1 и 0 в метрах (обозначим его как L_0 , м). Измеряем расстояние между точками 0 и 3 на фотоснимке, мм, рис. 2 (обозначим его как x). Находим расстояние между точками 0 и 2 на спутниковом снимке, (обозначим его как mf). Определяем расстояние между точками 0 и 3 на спутниковом снимке, м, рис. 1 (обозначим его как m). Поделив одно на другое, получаем средний масштаб снимка на участке 0-3, м/мм. Обозначим его как ms_0

$$ms_0 = m/x \quad (1)$$

где: m – расстояние между точками 0–3 на рис.1, м;
 x – расстояние между точками 0–3 на рис.2, мм.

В каждой точке фотографии разные масштабы. Например, средний масштаб на участке от точки i до точки 0 зависит от расстояния от этой точки до точки 0 (расстояние $l(i)$ на рис.2).

Для того, чтобы рассчитать расстояния в перпендикулярной плоскости, нужно знать не только средние, но и местные масштабы в каждой точке.

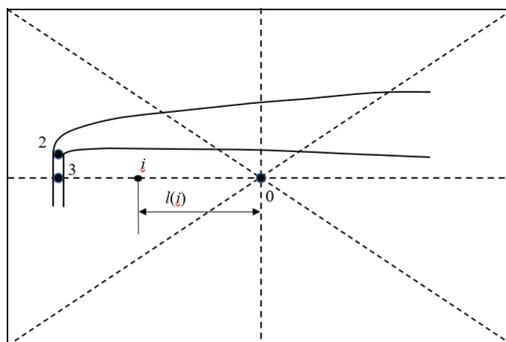


Рис. 2. Фотография дымового факела Fig.2 Photo of a smoke plume
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Поделим отрезок 0-3 на рис. 2 на достаточно большое количество одинаковых отрезков n . Тогда размер каждого отрезка будет d , м.

$$d = x/n, \quad (2)$$

где:
 n – количество отрезков одинаковой длины.

Длину текущего отрезка $l(i-0)$ выразим как

$$l(i) = d \cdot i, \quad (3)$$

где: i изменяется от 1 до n .

Отношение текущего катета $l(i)$ треугольника 1-3-0 к L_0 обозначим как $l_0(i)$

$$l_0(i) = l(i)/L_0. \quad (4)$$

Находим текущий угол αi , рис. 1

$$\alpha i = \text{Arctg}(l_0(i)). \quad (5)$$

Находим текущий средний угловой масштаб $ms(i)$ как

$$ms(i) = l(i)/\alpha i. \quad (6)$$

Находим текущую разность соседних углов $\Delta \alpha i$

$$\Delta \alpha i = \alpha(i) - \alpha(i-1). \quad (7)$$

Находим текущий местный угловой масштаб $mm(i)$ как

$$mm(i) = d/\Delta \alpha i. \quad (8)$$

Далее находим относительное расстояние от центра снимка

$$l_{от}(i) = l(i)/x \quad (9)$$

и относительное изменение среднего масштаба как отношение текущего среднего масштаба к масштабу на ближнем к точке 0 участке (на первом участке)

$$ms_{от}(i) = ms(i)/ms(1). \quad (10)$$

То же самое делается для местных масштабов

$$mm_{от}(i) = mm(i)/mm(1). \quad (11)$$

Для варианта $L_0 = 2430$ м, $x = 1040$ м и $n = 30$ средние и местные относительные масштабы показаны на рис. 3.

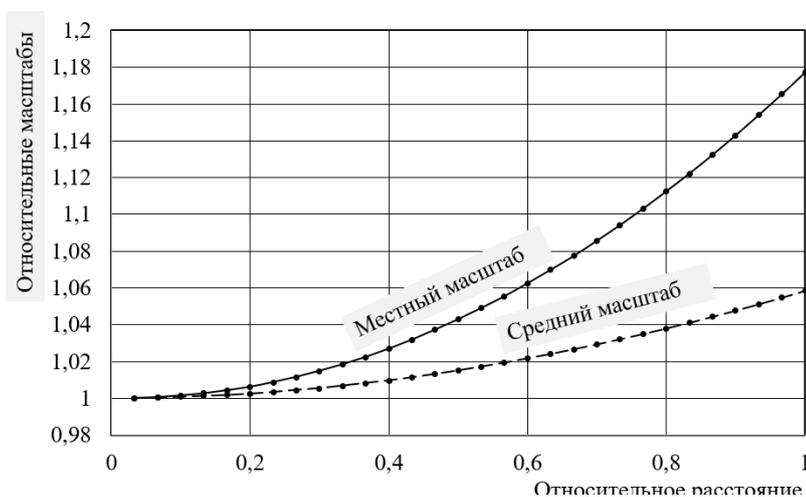


Рис. 3. Изменение текущих относительных масштабов Fig. 3. Change in current relative scales

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные зависимости аппроксимируем методом наименьших квадратов. В частности, для данного примера получено

$$ms_{OT}(i) = 0,0561 \cdot l_{OT}(i)^2 + 0,0028 \cdot l_{OT}(i) + 0,9997 \quad (12)$$

и

$$mm_{OT}(i) = 0,1828 \cdot l_{OT}(i)^2 - 0,0058 \cdot l_{OT}(i) + 1,0001. \quad (13)$$

В обоих случаях достоверность аппроксимации $R^2 = 1$.

Увеличение количества отрезков деления n от 20 до 30 позволило увеличить точность расчета масштабов на 0,2 %. Дальнейшее увеличение количества отрезков можно не делать, т.к. получаемое увеличение точности расчетов заведомо меньше погрешности визуального определения границ дымового факела.

Далее найдем масштабы снимка по вертикали, используя для этого известные размеры дымовой трубы, попавшей в кадр. Для этого необходимо разделить высоту дымовой трубы на достаточно большое количество участков. Из предварительного анализа установлено, что достаточно $n = 30$. При высоте дымовой трубы $H = 150$ м длина каждого участка составит $d_B = 5$ м. Дальнейшее увеличение их количества на точность расчёта практически не влияет.

Разделив высоту дымовой трубы на участки, составим расчетную схему для каждого участка и найдем текущее отношение противолежащего катета к прилежащему то есть отношение $\frac{m_{Bi}}{L}$. Затем найдем текущий угол α_i , град., как

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{m_{Bi}}{L}\right).$$

Найдем текущий средний вертикальный угловой масштаб, м/град, M_i^{CB}

$$M_i^{CB} = \frac{m_{Bi}}{\alpha_i}$$

Относительное изменение среднего вертикального углового масштаба определим как:

$$M_{OT}^{CB} = \frac{M_i^{CB}}{M_1^{CB}}.$$

Найдем разность углов соседних вертикальных участков как:

$$\Delta\alpha_{Bi} = \alpha_{Bi+1} - \alpha_{Bi}.$$

Текущий местный вертикальный угловой масштаб:

$$M_i^{MB} = \frac{d_B}{\Delta\alpha_{Bi}}.$$

Относительное изменение местного вертикального углового масштаба:

$$M_{OT}^{MB} = \frac{M_i^{MB}}{M_1^{MB}}.$$

Относительное расстояние по вертикальному участку:

$$l_{Vi} = \frac{n_i}{n} \cdot \tag{20}$$

Далее в таблице приведены результаты расчета каждого участка для вертикальной составляющей при $L = 788$ м и $h_B = 150$ м

Таблица 1
Table 1

Вертикальная составляющая угловых масштабов
The vertical component of angular scales

| n_i | m_{Vi} | $\frac{m_{Vi}}{L}$ | α_{Vi} | M_i^{CB} | M_{OT}^{CB} | $\Delta\alpha_{Vi}$ | M_i^{MB} | M_{OT}^{MB} | l_{Vi} |
|-------|----------|--------------------|---------------|------------|---------------|---------------------|------------|---------------|----------|
| 1 | 5 | 0,006 | 0,364 | 13,753 | 1,000 | 0,364 | 13,753 | 1,000 | 0,033 |
| 2 | 10 | 0,013 | 0,727 | 13,754 | 1,000 | 0,364 | 13,754 | 1,000 | 0,067 |
| 3 | 15 | 0,019 | 1,091 | 13,755 | 1,000 | 0,363 | 13,757 | 1,000 | 0,100 |
| 4 | 20 | 0,025 | 1,454 | 13,756 | 1,000 | 0,363 | 13,760 | 1,000 | 0,133 |
| 5 | 25 | 0,032 | 1,817 | 13,758 | 1,000 | 0,363 | 13,764 | 1,001 | 0,167 |
| 6 | 30 | 0,038 | 2,180 | 13,760 | 1,000 | 0,363 | 13,770 | 1,001 | 0,200 |
| 7 | 35 | 0,044 | 2,543 | 13,762 | 1,001 | 0,363 | 13,777 | 1,002 | 0,233 |
| 8 | 40 | 0,051 | 2,906 | 13,765 | 1,001 | 0,363 | 13,784 | 1,002 | 0,267 |
| 9 | 45 | 0,057 | 3,268 | 13,768 | 1,001 | 0,362 | 13,793 | 1,003 | 0,300 |
| 10 | 50 | 0,063 | 3,631 | 13,772 | 1,001 | 0,362 | 13,803 | 1,004 | 0,333 |
| 11 | 55 | 0,070 | 3,993 | 13,775 | 1,002 | 0,362 | 13,814 | 1,004 | 0,367 |
| 12 | 60 | 0,076 | 4,354 | 13,780 | 1,002 | 0,362 | 13,826 | 1,005 | 0,400 |
| 13 | 65 | 0,082 | 4,715 | 13,784 | 1,002 | 0,361 | 13,840 | 1,006 | 0,433 |
| 14 | 70 | 0,089 | 5,076 | 13,789 | 1,003 | 0,361 | 13,854 | 1,007 | 0,467 |
| 15 | 75 | 0,095 | 5,437 | 13,795 | 1,003 | 0,360 | 13,870 | 1,008 | 0,500 |
| 16 | 80 | 0,102 | 5,797 | 13,800 | 1,003 | 0,360 | 13,886 | 1,010 | 0,533 |
| 17 | 85 | 0,108 | 6,157 | 13,806 | 1,004 | 0,360 | 13,904 | 1,011 | 0,567 |
| 18 | 90 | 0,114 | 6,516 | 13,813 | 1,004 | 0,359 | 13,923 | 1,012 | 0,600 |
| 19 | 95 | 0,121 | 6,874 | 13,820 | 1,005 | 0,359 | 13,943 | 1,014 | 0,633 |
| 20 | 100 | 0,127 | 7,232 | 13,827 | 1,005 | 0,358 | 13,964 | 1,015 | 0,667 |
| 21 | 105 | 0,133 | 7,590 | 13,834 | 1,006 | 0,358 | 13,986 | 1,017 | 0,700 |
| 22 | 110 | 0,140 | 7,947 | 13,842 | 1,006 | 0,357 | 14,009 | 1,019 | 0,733 |
| 23 | 115 | 0,146 | 8,303 | 13,850 | 1,007 | 0,356 | 14,034 | 1,020 | 0,767 |
| 24 | 120 | 0,152 | 8,659 | 13,859 | 1,008 | 0,356 | 14,059 | 1,022 | 0,800 |
| 25 | 125 | 0,159 | 9,014 | 13,868 | 1,008 | 0,355 | 14,086 | 1,024 | 0,833 |
| 26 | 130 | 0,165 | 9,368 | 13,877 | 1,009 | 0,354 | 14,113 | 1,026 | 0,867 |
| 27 | 135 | 0,171 | 9,722 | 13,887 | 1,010 | 0,354 | 14,142 | 1,028 | 0,900 |
| 28 | 140 | 0,178 | 10,074 | 13,897 | 1,010 | 0,353 | 14,172 | 1,030 | 0,933 |
| 29 | 145 | 0,184 | 10,426 | 13,907 | 1,011 | 0,352 | 14,203 | 1,033 | 0,967 |
| 30 | 150 | 0,190 | 10,778 | 13,918 | 1,012 | 0,351 | 14,235 | 1,035 | 1,000 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные зависимости аппроксимируем методом наименьших квадратов. В частности, для данного примера получено

$$M_{OT}^{CB} = 0,0119(l_{Bi})^2 + 0,0001(l_{Bi}) + 0,9999$$

$$M_{OT}^{MB} = 0,0362(l_{Bi})^2 - 0,0012(l_{Bi}) + 1,0000$$

В обоих случаях достоверность аппроксимации $R^2 = 1$.

Далее могут иметь место два варианта расчета. Первый вариант, это когда дымовая труба в значительной своей части загорожена препятствиями или находится настолько далеко, что невозможно уверенно визуализировать наружные светофорные площадки (более 2 км), или неизвестны уровни светофорных площадок. И второй, когда расстояние до трубы составляет порядка 1 км, и когда видны светофорные площадки.

Рассмотрим первый вариант, (рис. 5). Нужно найти координаты точки 1 относительно дымовой трубы.

Если принять в уравнении (12) $l_{OT}(i) = 1$, то получим $ms_{OT}(i) = 1,0586$. Это означает, что средний масштаб на участке 0-3 в 1,0586 раза больше масштаба в центре снимка. Отсюда находим масштаб в центре снимка m_0 , м/мм

$$m_0 = ms_0 / 1,0586. \quad (23)$$

Обозначим координаты рассчитываемой точки: абсцисса – x_1 (отсчитывается от вертикальной средней линии снимка) и ордината – y_1 (отсчитывается от горизонтальной средней линии снимка), рис. 5.

Находим относительное расстояние по формуле (9) $l_{OT}(i)$. Подставляем это значение в уравнение (12). Расстояние от центра до рассчитываемой точки по горизонтали по линии 0-3 на рис. 5 найдем как

$$L1 = x_1 \cdot m_0 \cdot ms_{OT}(i) \quad (24)$$

где m_0 – средний исходный масштаб м/мм;

x_1 – расстояние по снимку, мм;

$L1$ – расстояние по горизонтали в натуре, м.

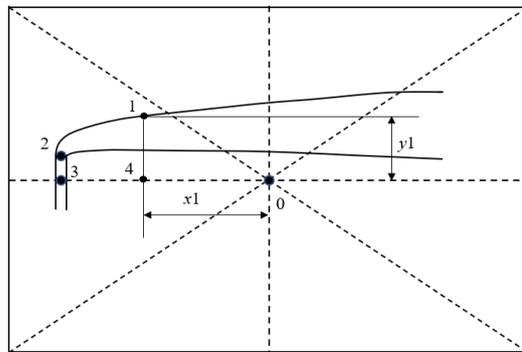


Рис. 5. Схема к определению координат точки *Fig. 5. The scheme for determining the coordinates of a point*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Учитываем, что нам нужны размеры не по линии 0-3, а по линии 0-2 на рис. 1, поэтому вводим поправку равную отношению mf/m . Если рассчитываемая точка располагается слева от средней вертикальной линии снимка, то расстояния должны увеличиваться и действительная ордината по направлению траектории факела будет равна

$$G1 = L1 \cdot mf / m. \quad (25)$$

Если рассчитываемая точка располагается справа от средней вертикальной линии снимка, то расстояния должны уменьшаться и действительная ордината по направлению траектории факела будет равна

$$G1 = L1 \cdot m / mf. \quad (26)$$

Далее находим относительное расстояние и средний масштаб по ординате и превышение данной точки над горизонтальной средней линией. Сначала находим местный масштаб в точке 4, рис. 5. Для этого найденное относительное расстояние $l_{от}(i)$ подставляем в уравнение (13) и получаем $mm_{от}(4)$. Далее, зная расстояние $y1$, находим относительное расстояние для этого участка и, используя опять формулу для средних масштабов, находим $L2$, м

$$L2 = y1 \cdot m0 \cdot mm_{от}(4) \cdot ms_{от}(y1), \quad (27)$$

где $m0$ – средний исходный масштаб м/мм;

$y1$ – расстояние по снимку, мм;

$W1$ – расстояние по вертикали в натуре, м;

$mm_{от}(4)$ – местный относительный масштаб в точке 4;

$ms_{от}(y1)$ – средний относительный масштаб на участке $y1$;

Делаем пересчет с плоскости фотоснимка (по линии 3-0) на направление факела (линия 2-0 на рис. 2) по высоте.

$$W1 = L2 \cdot [1 + (L / mt - 1) \cdot x1 / m]. \quad (28)$$

Аналогично рассчитываем координаты устья трубы относительно точки 0. Вычисляя из координат устья координаты рассчитанной точки, находим координаты точки относительно устья.

Далее рассмотрим второй вариант, когда в качестве исходного можно использовать масштаб, определенный по известным размерам дымовой трубы. Для расчета траектории дымового факела должны быть: фотоснимок в полных границах с дымовой трубой в кадре, (рис. 6), и спутниковый снимок с планом места съемки.

Направление линии на карте проводится в соответствии с направлением средней линии на рисунке 6. по характерным координатам местности. Для простоты обработки подобных вычислений достаточно воспользоваться, например Microsoft Excel. На рисунке 7 показана начальная страница текста программы в Excel.

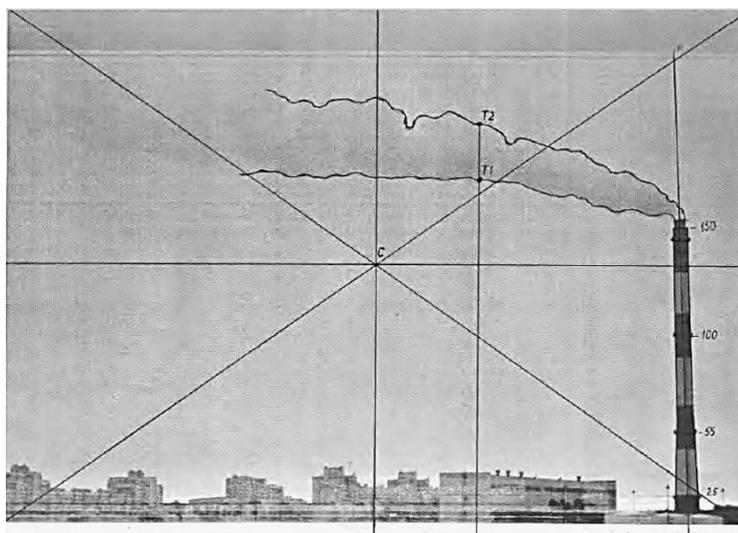


Рис. 6. Снимок траектории дымового факела с дымовой трубой в кадре
Fig. 6. A snapshot of the trajectory of a smoke plume with a stack in the frame

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Результатом реализации описанного алгоритма расчета стала программа, созданная в общедоступной среде Excel. Далее опишем порядок пользования и ввода исходных данных. На рис. 6 измеряем расстояние между устьем и нижней площадкой дымовой трубы. Уровень устья – 150 м, а нижней площадки 25 м. Получилось 106 мм. Вставляем это значение в ячейку С3, рис. 7. В ячейке С5 вычисляется средний масштаб по трубе на участке 25-150 м, который составляет 1,179 м/мм. Делаем первое приближение. Принимаем,

что такой же масштаб имеет место по всей трубе, тогда участок от 0 до 150 м будет занимать на снимке 127,2 мм. Это значение вычисляется в ячейке С7.

Далее по рисунку 2, (спутниковому снимку) определяем расстояние от точки съемки (точка 1) до дымовой трубы (точка 2). Это расстояние составляет 963 м. Заносим его в ячейку В10. В ячейку С10 вставляем высоту дымовой трубы, 150 м.

В ячейку D10 вставляем количество равных интервалов, на которые будем делить высоту дымовой трубы, чтобы определить, как изменяется угловой масштаб по вертикали от горизонта до устья трубы. Из предварительного анализа установлено, что достаточно иметь 30 отрезков. Дальнейшее увеличение их количества на точность расчетов практически не влияет. На рисунке 6 измеряем расстояние между устьем и нижней площадкой дымовой трубы. Уровень устья – 150 м, а нижней площадки 25 м. Получилось 106 мм. Вставляем это значение в ячейку С3, (рис. 7). В ячейке С5 вычисляется средний масштаб по трубе на участке 25-150 м, который составляет 1,179 м/мм.

| ▲ | В | С | D | E | F | G | Н | I | J | K | L | М |
|----|------|--|----|----------|-----------------------|----------|----------|-------------|----------|-----------|----------|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | Участок трубы 25-150 м (125 м) на фотографии, мм | | | | | | | | | | |
| 3 | | 106 | | | | | | | | | | |
| 4 | | Средний масштаб по трубе на участке 25-150 м.; м/мм | | | | | | | | | | |
| 5 | | 1,179245 | | | | | | | | | | |
| 6 | | Первое приближение. Принимаем, что такой же масштаб имеет место по всей трубе, тогда участок от 0 до 150 м | | | | | | | | | | |
| 7 | | 127,2 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | L, м | т, м | п | | м/п, м, длина участка | | | | | | | |
| 10 | 963 | 150 | 30 | | 5 | | | | | Вертикаль | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 13 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | 1 | 5 | 0,005192 | 0,297483 | 16,80767 | 1 | 0,297483204 | 16,80767 | 1 | 0,033333 | |
| 15 | | 2 | 10 | 0,010384 | 0,59495 | 16,80812 | 1,000027 | 0,297467166 | 16,80858 | 1,000054 | 0,066667 | |
| 16 | | 3 | 15 | 0,015576 | 0,892385 | 16,80888 | 1,000072 | 0,297435096 | 16,81039 | 1,000162 | 0,1 | |
| 17 | | 4 | 20 | 0,020768 | 1,189772 | 16,80994 | 1,000135 | 0,297387003 | 16,81311 | 1,000323 | 0,133333 | |
| 18 | | 5 | 25 | 0,025961 | 1,487095 | 16,8113 | 1,000216 | 0,297322903 | 16,81673 | 1,000539 | 0,166667 | |

Рис. 7. Начальная страница программы Fig. 7. The initial page of the calculation program

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

| ▲ | F | G | Н | I | J | K | L | M |
|-----|----------|----------|---|-----------------------|----------|----------|-------------------------|---|
| 136 | 9,020892 | 16,91259 | 1,00833 | 0,386170051 | 17,17723 | 1,024108 | 0,76666667 | |
| 137 | 9,406237 | 16,92494 | 1,009066 | 0,385345408 | 17,21399 | 1,026299 | 0,8 | |
| 138 | 9,790726 | 16,9378 | 1,009832 | 0,384488658 | 17,25235 | 1,028586 | 0,83333333 | |
| 139 | 10,17433 | 16,95116 | 1,010629 | 0,383600251 | 17,29231 | 1,030968 | 0,86666667 | |
| 140 | 10,55701 | 16,96504 | 1,011456 | 0,382680653 | 17,33386 | 1,033446 | 0,9 | |
| 141 | 10,93874 | 16,97941 | 1,012313 | 0,381730341 | 17,37701 | 1,036018 | 0,93333333 | |
| 142 | 11,31949 | 16,99429 | 1,013201 | 0,380749804 | 17,42176 | 1,038686 | 0,96666667 | |
| 143 | 11,69923 | 17,00967 | 1,014118 | 0,379739545 | 17,46811 | 1,04145 | 1 | |
| 144 | | | | | | | | |
| 145 | | | | Коэффициенты по трубе | | | | |
| 146 | | | ms | | | | mm | |
| 147 | | | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | | | | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | |
| 148 | | | b | 0,999985585 | | b | 1,000000001 | |
| 149 | | | c1 | 5,22238E-05 | | c1 | -0,00080873 | |
| 150 | | | c2 | 0,007993647 | | c2 | 0,02426176 | |
| 151 | | | R2 | 0,999999347 | | R2 | 1 | |
| 152 | | | | | | | | |
| 153 | | | | | | | | |
| 154 | | | ms - относительный средний масштаб | | | | | |
| 155 | | | mm - относительный местный масштаб | | | | | |
| 156 | | | | | | | | |
| 157 | | | b, c1, c2 - коэффициенты квадратного трехчлена, которые вычисляются | | | | | |
| 158 | | | автоматически по данным столбцов 10, 6 и 9. | | | | | |
| 159 | | | R2 - показатель точности аппроксимации | | | | | |
| 160 | | | Если R-квадрат > 0,95, точность аппроксимации высокая | | | | | |

Рис. 8. К алгоритму расчета Fig. 8. To the algorithm for calculating coefficients for scale

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Коэффициенты аппроксимации в двучленах вычислялись по процедуре =ИНДЕКС(ЛИНЕЙН(.....)), которая реализована в области Н-М:145-151, рис. 8. Из этих же ячеек значения коэффициентов берутся автоматически для дальнейшего расчета. В расчетные формулы вставляется интервал строк 46-75.

Результаты расчета коэффициентов приведены на рисунке 9.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-----|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|----|-------------------------|----------|---|---|
| 178 | | | | | | | | | |
| 179 | | | Вертикаль (по трубе) | | | | | | |
| 180 | | | | | | | | | |
| 181 | | | ms (средний масштаб) | | | mm (местный масштаб) | | | |
| 182 | | | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | | | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | | | |
| 183 | | | b | 0,999986 | | b | 1 | | |
| 184 | | | c1 | 5,22E-05 | | c1 | -0,00081 | | |
| 185 | | | c2 | 0,007994 | | c2 | 0,024262 | | |
| 186 | | | R2 | 0,999999 | | R2 | 1 | | |
| | L | M | N | O | P | Q | R | | |
| | Горизонталь | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | ms (средний масштаб) | | | mm (местный масштаб) | | | | | |
| | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | | | $y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$ | | | | | |
| | b | 0,99996739 | | | b | 1 | | | |
| | c1 | 0,000161121 | | | c1 | -0,00143 | | | |
| | c2 | 0,014003655 | | | c2 | 0,042879 | | | |
| | R2 | 0,99999801 | | | R2 | 1 | | | |

Рис. 9. Результат расчета коэффициентов для масштабов

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

После расчета масштабов координаты точек траектории определяются по методике, описанной формулами (23) – (28).

Обсуждение (Discussions)

Наличие известных размеров дымовой трубы и уровней светофорных площадок позволило провести тщательную проверку точности предлагаемой методики. В результате получено, что рассчитанные по фотографии уровни светофорных площадок отличались от размеров на строительных чертежах в пределах одного метра.

Сравнение расстояния с точки съемки до дымовой трубы по спутниковому снимку и с размером, определенным с помощью теодолита, показали их расхождение в пределах 10 м при расстояниях порядка 1000 м.

В качестве проверки были также введены координаты верхней части ж/б оболочки и верхней части диффузора. В результате должны были получить расстояние по горизонтали 0, уровень верхней части диффузора – 0, уровень верхней части ж/б оболочки дымовой трубы -4,7 м (высота диффузора Азинской дымовой трубы в Казани). Получили соответственно -0,007 м, -0,07 м и -4,09 м.

Ошибка в определении высоты диффузора составила 0,6 м. Таким образом при расчете фиксированных объектов методика позволят получить их координаты с расстояния примерно 1 км с точностью порядка 1 м. Однако при расчете траектории дымового факела вносится дополнительная погрешность при колебании направления ветра, что увеличивает погрешность в определении координат среднем до 2–3 м при длине траектории порядка 200–300 м.

Заключение (Conclusions)

В заключение можно отметить, что разработана новая, более простая, чем в [7] методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку, требующая минимальный набор исходных данных и минимального набора экспериментального оборудования, реализованная в общедоступной вычислительной среде и позволяющая получить результат с приемлемой для задач, связанных с метеорологией, точностью.

Эксперименты по определению траектории дымового факела по данной методике можно проводить при любой погоде и в любое время суток. Единственным условием является хорошая видимость дымового факела. На рис. 10 приведена фотография, сделанная в ночное время 9 января 2023 г. при устойчивом состоянии атмосферы и температуре наружного воздуха –31 °С.



Рис. 10. Траектории дымового факела в ночное время *Fig. 10. Trajectories of a smoke plume at night*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Литература

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 446 с.
2. Humphreys J. The rise of plumes of the South African Hing // *Atmospheric Environment*, 1973; Vol. 7, №11. pp. 1071-1077.
3. Bringfelt B. Plume rise measurements at industrial chimneys // *Atmospheric Environment*, 1968; Vol. 2, №6. pp. 575-598.
4. Буров М.И., Елисеев В.С., Новаковский Б.А. Стереофотограмметрический метод исследования атмосферной диффузии // *Труды ГГО*. 1969, вып. 238, с. 77–85.
5. Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях (РАФ-89) / Военно-топографическое управление генерального штаба, редакционно-издательский отдел / Отв. редактор А.И. Лосев. 1989. 105 с.
6. Елисеев В.С. К вопросу о фотографировании дымовых струй от промышленных источников // *Труды ГГО*. 1969, вып. 238, с. 86 – 95.
7. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Грибков А.М. Определение траектории дымового факела ТЭС по одиночному фотоснимку // *Труды МЭИ*. 1983, вып. 620, с. 6 –74.
8. D. Bruce Turner. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Chapel Hill: Trinity Consultants, Incorporated, 2007, 408 p.
9. Куфтырев К.А., Королев Д.В. Исследование процесса ассимиляции атмосферой токсичных компонентов дымовых газов котла // *Проблемы региональной экологии*. 2014. № 4. с. 131-136.
10. Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Федоренков Д.И. Моделирование начального участка дымового факела от четырехствольной трубы ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2020. № 10. с. 48-57.
11. Верховина Е.В., Сафаров А.С., Макухин В.Л. и др. Моделирование переноса выбросов твёрдых взвесей предприятиями теплоэнергетики на центральную экологическую зону байкальской природной территории // *Вода: химия и экология*. 2017. № 11-12 (113). с. 20-27.
12. Епифанов П.А., Карпова И.Е. Прогноз теплового состояния корабельных конструкций, находящихся в зоне действия газового факела корабельной энергетической установки // *Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова*. 2012. № 68(352). с. 65-68.
13. Леженин А.А., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В. Экспериментальные и численные исследования процессов распространения примесей от высотных источников // “Марчуковские научные чтения – 2019”: Тезисы Международной конференции, Новосибирск, 01–05 июля 2019 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2019. – С. 72.
14. Рапута В.Ф., Леженин А.А., Амикишиева Р.А. и др. Оценки высоты подъема и потока плавучести дымовых шлейфов от высотных труб ТЭС по спутниковой информации // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 6(413). с. 482-486.

15. Внук А.К., Розанова Ф.А. Влияние высотного ветрового режима на рассеивание выбросов // Теплоэнергетика. 1991. № 4. с. 29-31.

16. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. с. 131-145.

Авторы публикации:

Грибков Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.
<https://orcid.org/0000-0002-6805-2451>

Чичирова Наталья Дмитриевна – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

Мирсалихов Кирилл Маратович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет. <https://orcid.org/0000-0002-3755-3827>

References

1. Berlyand ME. *Sovremennye problemy atmosfernoï diffuzii i zagryazneniya atmosfery*. Leningrad.: Gidrometeoizdat, 1975. (In Russ).

2. Humphereys J. The rise of plumes of the South African Hing. *Atmospheric Environment*, 1973;7(11):1071-77. doi: 10.1016/0004-6981(73)90216-3.

3. Bringfelt B. Plume rise measurements at industrial chimneys. *Atmospheric Environment*, 1968;2(6): 575-598. doi: 10.1016/0004-6981(68)90065-6.

4. Burov MI., Eliseev VS., Novakovskii BA. Stereofotogrammetricheskii metod issledovaniya atmosfernoï diffuzii. *Trudy GGO*. 1969; 238: 77-85. (In Russ).

5. Losev AI. editor *Rukovodstvo po aerofotos"emke v kartograficheskikh tselyakh (RAF-89)*. Voenno-topograficheskoe upravlenie general'nogo shtaba, redaktsionno-izdatel'skii otdel. 1989. (In Russ).

6. Eliseev VS. K voprosu o fotografirovaniï dymovykh strui ot promyshlennykh istochnikov. *Trudy GGO*. 1969; 238: 86 – 95. (In Russ).

7. Volkov EP., Gavrilov EI., Gribkov AM., et al. Opredelenie traektorii dymovogo fakela TES po odinochnomu fotosnimku. *Trudy MEI*. 1983; 620: 63 – 74. (In Russ).

8. D. Bruce Turner. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Chapel Hill: Trinity Consultants, Incorporated, 2007, 408 p.

9. Kuftyrev KA., Korolev DV. The study of the process of assimilation of toxic components of the boiler flue gas in the atmosphere. *Regional Environmental Issues*. 2014; 4: 131-136. (In Russ).

10. Gribkov AM., Chichirova ND., Fedorenkov DI. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. *Thermal Engineering*. 2020; 67(10):724-732. (In Russ). doi 10.1134/S0040601520100043. – EDN LQCCAZ.

11. Verkhozina EV., Safarov AS., Makukhin VL. et al. Modeling emissions of solid particles in thermal power companies central ecological zone of the Baikal natural territory. *Water: chemistry and ecology*. 2017; 11-12(113): 20-27. (In Russ).

12. Epifanov, PA, Karpova IE. Prognoz teplovogo sostoyaniya korabel'nykh konstruksii, nakhodyashchikhsya v zone deistviya gazovogo fakela korabel'noi energeticheskoi ustanovki. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A.N. Krylova*. 2012; 68(352): 65-68. (In Russ).

13. Lezhenin, AA., Raputa VF. Eksperimental'nye i chislennye issledovaniya protsessov rasprostraneniya primesei ot vysotnykh istochnikov In Yaroslavtseva TV. *"Marchukovskie nauchnye chteniya - 2019"*; 01–05 Jul 2019; Novosibirsk: Novosibirskii natsional'nyi issledovatel'skii gosudarstvennyi universitet, 2019. – p. 72. (In Russ).

14. Raputa VF., Lezhenin AA., Amikishieva RA. Estimates of the Height of Rise and Buoyancy of Smoke Plumes from High Chimneys of Thermal Power Plants from Satellite Information. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023; 36(6): 785–789.

15. Vnukov AK., Rozanova FA. Vliyanie vysotnogo vetrovogo rezhima na rasseivanie vybrosov. *Teploenergetika*. 1991; 4:29-31. (In Russ).

16. Mirsalikhov KM., Gribkov AM., Chichirova ND. Analysis of methods for selection of optimal parameters of stack. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):131-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145>.

Authors of the publication

Aleksandr M. Gribkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Kirill M. Mirsalikhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.

Получено **15.05.2024 г.**

Отредактировано **17.05.2024 г.**

Принято **24.05.2024 г.**