

## Сокращение концентрации мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в строительстве за счет оптимизации объектов на строительной площадке

*С.Е. Манжилевская, В.В. Боброва, Н. Д. Кацман, Е.А. Петухова,*

*Чжан Цинтао*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В большинстве стран мира строительная отрасль является одним из основных источников загрязнения воздуха городских территорий и агломераций. Одни из наиболее опасных загрязняющих веществ - частицы мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>, образующиеся от производства пылящих строительных процессов. Благодаря оптимальному расположению объектов административно-хозяйственного назначения, на строительной площадке возможно снизить концентрацию пылевых выбросов частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>. Кроме того, стоимость метода борьбы с пылью вызывает беспокойство у подрядчиков, так как он ведет к удорожанию стоимости строительства. Следовательно, снижение общих транспортных расходов является еще одной целью оптимизации. Для решения сразу нескольких задач в исследовании используется многоцелевая оптимизация с применением алгоритма метода роя частиц для поиска оптимизированной планировки строительной площадки, которая может одновременно снизить как уровень загрязнения от пылевых выбросов, так и транспортные расходы.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, экологический мониторинг, защита атмосферного воздуха, экология в строительстве, пылеподавление, технико-экономическое обоснование, системы пылеулавливания, охрана труда в строительстве, строительная площадка, мелкодисперсная пыль.

В большинстве стран мира строительная отрасль является одним из основных источников загрязнения воздуха городских территорий и агломераций. Одни из наиболее опасных загрязняющих веществ - частицы мелкодисперсной пыли (particle matter, далее PM) PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>, образующиеся от производства пылящих строительных процессов [1]. В связи со спецификой производства строительных процессов, большинству рабочих на строительной площадке приходится работать в непосредственном контакте с источниками пылевых выбросов [2].

В условиях роста объемов высотного строительства в стесненной городской застройке проблемы сохранения благоприятной экологической обстановки, особенно сокращение загрязненности воздуха городской среды твердыми взвешенными частицами, становятся важной задачей, которая

---

требует исследований, проведения мониторингов пылевых выбросов на весь период производства строительных работ и проработки проектных решений по возведению объектов с учетом полученных ранее результатов.

Целью данного исследования является достижение баланса в возможности снизить влияние пылевых выбросов частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> на рабочих-строителей и достичь оптимального объема финансовых затрат по транспортировке строительных материалов внутри площадки при производстве работ за счет оптимизации плана расположения административно-хозяйственных объектов на строительной площадке. Решение данного вопроса способствует разработке многоцелевой оптимизационной модели для определения оптимальных показателей с обеих сторон.

Задача данного исследования – расположить административно-хозяйственные объекты на строительной площадке, применяя закон диффузии пылевых выбросов и данные о количестве рабочих, необходимых для рациональной реализации строительных процессов, так, чтобы расходы, связанные с внутривоздушной транспортировкой материалов не превышали оптимально допустимых объемов [3]. Принцип расчета предполагает увеличение расстояния между источниками пылевых выбросов и рабочими-строителями, которые выполняют непосредственно пылящие строительные процессы для снижения уровня концентрации загрязняющих веществ, принимая во внимание климатические условия расположения участка строительства. Применяя на практике данные организационно-управленческие решения при разработке проекта, возможно уменьшить негативное воздействие на рабочих, что, вероятно, повлияет на окончательную стоимость подрядных работ. С учетом применения в подготовке инвестиционно-строительного проекта для поиска оптимального решения совместных задач алгоритмов многокритериальной оптимизации, с

---

помощью метода роя частиц (далее МРЧ) реализуется вариантное проектирование и выбор таких проектных решений, которые бы удовлетворяли потребности всех заинтересованных участников проекта [4].

Для проектирования строительного генерального плана площадки, где планируется снижение негативного воздействия пылевого загрязнения при сохранении минимальных затрат на транспортировку материалов, предлагается к внедрению следующая схема проработки проектных решений, представленная на рис. 1.

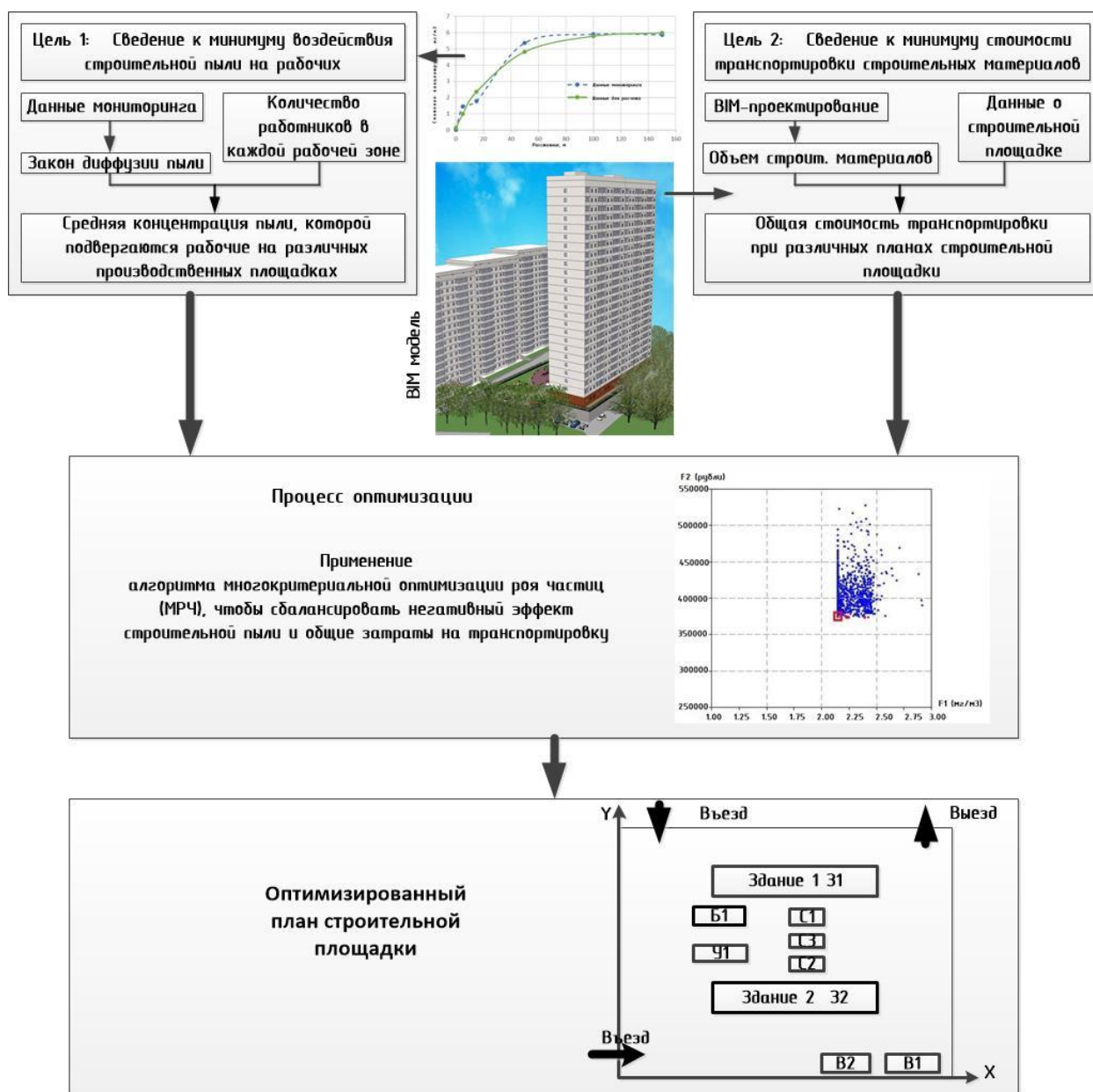


Рис. 1. – Схема разработки многокритериальных проектных решений

Строительная пыль может привести к тому, что строители начнут страдать от респираторных заболеваний, таких, как сердечно-сосудистые заболевания, цереброваскулярные заболевания, и т. д. [5].

Обычно загрязняющее вещество подвергается диффузии во всех направлениях перемещения в воздухе и осаждения под действием силы тяжести [6, 7]. Следовательно, под действием ветра величина снижения концентрации загрязняющего вещества имеет определенную зависимость отдаленности от источника загрязнения, также важными факторами являются данные мониторинга пылевого загрязнения, направление ветра, что можно рассчитать и определить через экспоненциальную модель, представленную на рис. 2 [8].

Расчет концентрации пылевых выбросов на рабочем месте  $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), которые образуются от источника  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), происходит путем суммирования всех источников пылевых выбросов, что можно рассчитать посредством следующих уравнений:

$$CDC_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} + C_b, \quad (1)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} SC_j - Y, & | SC_j \geq Y \\ 0, & | SC_j < Y \end{cases}, \quad (2)$$

$$Y = 6.02 - 5.882e^{-\frac{wd_{ij}}{31.59}}, \quad (3)$$

где  $CDC$  – концентрация строительной пыли на рабочем месте  $i$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $C_{ij}$  – концентрация строительной пыли на рабочем месте, исходящую от источника, значение которой можно получить из уравнения (2);  $C_b$  – фоновая концентрация строительной пыли, концентрация в наветренной точке принимается как  $C_b$ ;  $SC_j$  – концентрация источника пыли  $j$ ;  $Y$  – величина ослабления концентрации строительной пыли;  $wd_{ij}$  – расстояние между рабочим местом  $i$  и источником пыли  $j$  по ведущему направлению ветра.

Если концентрация источника пыли  $SC_j$  больше, чем значение рассеивания  $Y$ , соответственно,  $C_{ij}$  равна концентрации источника пыли  $SC_j$  минус значение рассеивания  $Y$ . Если концентрация источника пыли  $SC_j$  меньше, чем значение рассеивания  $Y$ , тогда  $C_{ij}$  равен 0, т.е. в данной ситуации источник пыли  $j$  не оказывает негативного влияния на рабочее место  $i$  [9].

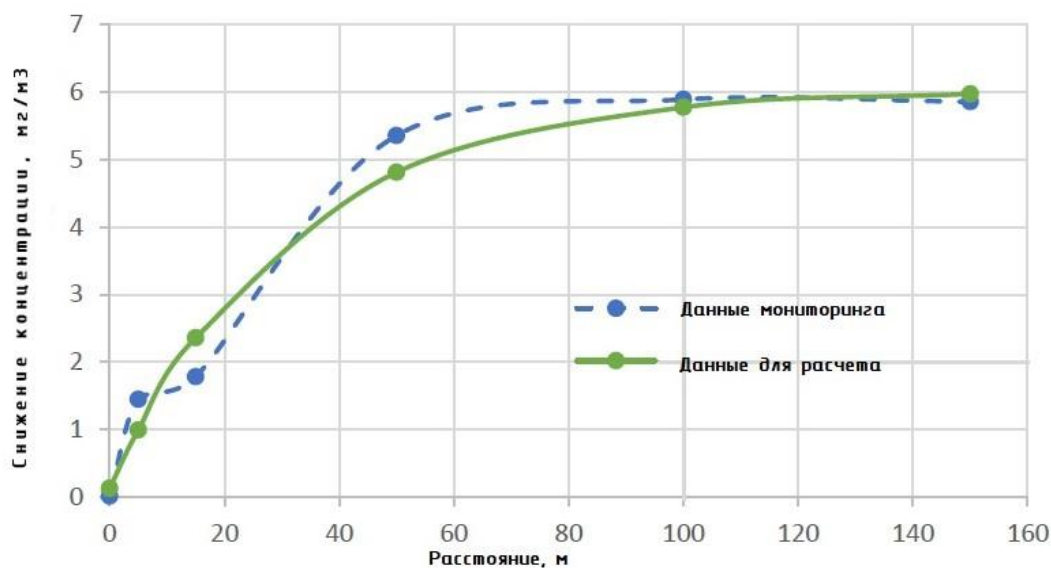


Рис. 2. – Модель снижения концентрации пылевых выбросов

Снижение негативного воздействия от пылевых выбросов на строительной площадке в виде целевой функции  $F_1$  имеет следующий вид:

$$F_1 = \min \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m CDC_i \times W, \quad (4)$$

где  $F_1$  – целевая функция, определяющая снижение концентрации загрязняющего вещества;  $W$  – количество рабочих на строительной площадке и  $W_i$  – количество строителей на рабочем месте  $i$ .

Общее количество строителей на площадке может быть представлено общей суммой численности всех работников на своих рабочих местах:

$$W = \sum_{i=1}^m W_i. \quad (5)$$

Для снижения негативного воздействия на строителей пылевых выбросов административно-хозяйственные объекты необходимо располагать с подветренной стороны.

Второй целью является расчет целевой функции  $F_2$ , обеспечивающей снижение затрат на внутриплощадочную перевозку строительных материалов, данная функция имеет вид:

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m d_{ij} \times C_{ij} \times f_{ij}, \quad (6)$$

где  $d_{ij}$ ,  $C_{ij}$  и  $f_{ij}$  – расстояния, на единицу длины и частоту перевозок между объектами  $i$  и  $j$ .

В зависимости от конфигурации земельного участка, отведенного под строительную площадку для возведения здания значения,  $d_{ij}$ ,  $C_{ij}$  и  $f_{ij}$  будут различаться, например  $d_{ij}$  – расстояние между двумя возводимыми объектами,  $C_{ij}$  – расстояние, которое проходит каждый вид транспорта,  $f_{ij}$  – расстояние, которое проходит транспорт с конкретным строительным материалом.

В процессе проведения оптимизации двух целевых функций, необходимо определить ограничения, чтобы получить реалистичные результаты. Наиболее удобно расчеты оптимального плана строительной площадки привести к системе координат.

Все объекты должны располагаться в границах строительной площадки. Чтобы предотвратить размещение объектов за пределами доступных мест, сформулированы следующие уравнения:

$$x_i \geq \frac{b_i}{2}, \quad (7)$$

$$x_{bd} - x_i \geq \frac{b_i}{2}, \quad (8)$$

$$y_i \geq \frac{l_i}{2}, \quad (9)$$

$$y_{bd} - y_i \geq \frac{l_i}{2}, \quad (10)$$

где  $x_i, y_i$  обозначают координаты центра объекта  $i$ ;  $b_i$  и  $l_i$  – горизонтальная и вертикальная длина объекта  $i$ , соответственно;  $x_{bd}$  и  $y_{bd}$  – горизонтальные и вертикальные границы доступных локаций.

При возведении на строительной площадке двух и более объектов на одном этапе установлено минимальное расстояние между объектами, чтобы избежать взаимного влияния и обеспечить безопасность строительства. Ограничение применяется с помощью следующего уравнения:

$$\min\{0.5(b_i + b_j) + h_{ij} - |x_i - x_j|, 0.5(l_i + l_j) + v_{ij} - |y_i - y_j|\} \leq 0, \quad (11)$$

где  $h_{ij}$  и  $v_{ij}$  – минимальные безопасные расстояния по горизонтали и вертикали между объектами  $i$  и  $j$ , соответственно.

Эти два параметра позволяют обеспечить безопасность строительных работ на соответствующем объекте и базовую транспортировку строительных материалов на объектах. Конкретные значения минимального безопасного расстояния могут быть определены в соответствии с требованиями строительных проектов [10].

В применяемом для расчета алгоритме МРЧ координаты центра объекта  $i - (x_i, y_i)$  – это переменные решения.

Для проверки эффективности разработанной методики предложено внедрить результаты исследования в проект производства работ 27-28-этажного многоквартирного жилого дома, площадка которого располагается в западной части г. Ростова-на-Дону. Строительная площадка должна включать нижеследующие административно-хозяйственные объекты, представленные в таблице №1.

Строительные материалы доставляются на строительную площадку и затем временно складываются на складах. При необходимости строительные материалы сначала транспортируются на площадку для укрупненной сборки, а затем транспортируются в рабочую зону.

Таблица № 1

Объекта, проектируемые на строительной площадке

Наименование	Обозначение	Площадь, м <sup>2</sup>
Открытый склад	С1	175
Полузакрытый склад	С2	50
Закрытый склад	С3	80
Площадка для бетоноузла	Б1	200
Временные здания административного назначения	В1	50
Временные здания санитарно-бытового назначения	В2	80
Площадка для укрупненной сборки	У1	330

Проектная документация для данного объекта разрабатывалась с применением Building Information Model (далее BIM) технологий, таким образом, количество различных строительных материалов можно извлечь из BIM-модели, представленной на рис. 3.



Рис. 3. – BIM-модель проекта

Численность строителей, работающих на местах, являющихся источниками пылевого загрязнения, представлены в таблице №2.



Таблица № 2

Численность работников на соответствующих рабочих местах

Обозначение	Наименование	Требуемое кол-во рабочих, чел
У1	Площадка для укрупненной сборки	10
В2	Временные здания санитарно-бытового назначения	5
Б1	Площадка для бетоноузла	5
В1	Временные здания административного назначения	10
31,32	Захватка на этаже	20 на каждый этаж

На строительной площадке некоторые строительные работы, такие, как резка арматуры, смешивание цемента и т. д., приводят к образованию большого количества строительной пыли [11]. Для точного измерения концентрации пыли при производстве строительных работ производились замеры с помощью ручной счетчика частиц Handheld 3016. Преобладающее направление ветра в Западном жилом массиве г. Ростова-на-Дону – восточное, в период мониторинга скорость ветра была слабая, чуть более 1 м/с. В таблице №3 представлены результаты концентрации пылевых выбросов источников загрязнения.

Таблица № 3

Показатели концентрации пылевых выбросов на строительной площадке

Обозначение	Источник пыли	Строительные процессы	Концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>
У1	Площадка для укрупненной сборки	Резка арматуры	5,65
Б1	Площадка для бетоноузла	Смешивание бетона Заливка бетона	2,24
31,32	Захватка на этаже	Монтаж конструкций	2,7

Оптимизированный план строительной площадки может быть создан путем применения предложенной многоцелевой модели планировки строительной площадки и алгоритма МРЧ. Кодирование модели и алгоритма осуществлялось при помощи языка программирования Python. После нескольких попыток поиска был найден фронт Парето и оптимальное

множество Парето, которое представляет оптимальные данные для плана строительной площадки [12]. В связи с этим фактом подрядчику необходимо выбрать наиболее подходящее решение в соответствии с текущей ситуацией.

На рис. 4 представлен вид процесса выбора наиболее приемлемых решений, выбор варианта будет зависеть от приоритетов подрядчика, а оптимизированный план площадки будет представлен, как на рис. 5.

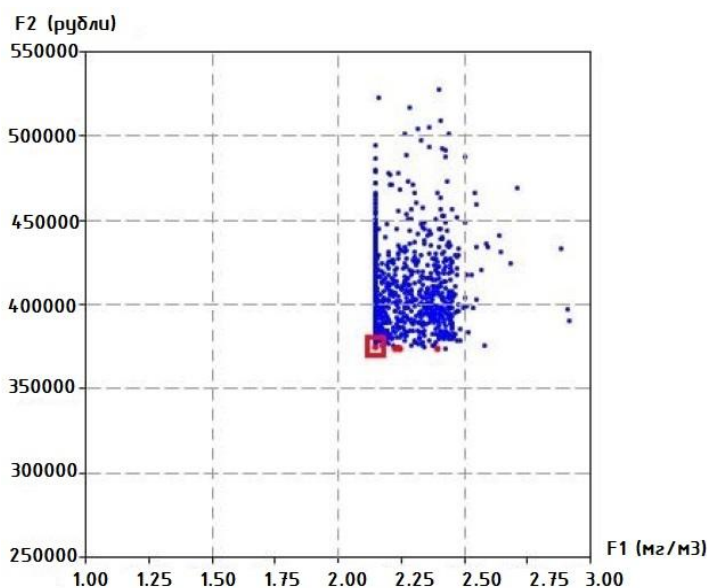


Рис. 4. – Результаты использования алгоритма МРЧ двух целевых функций

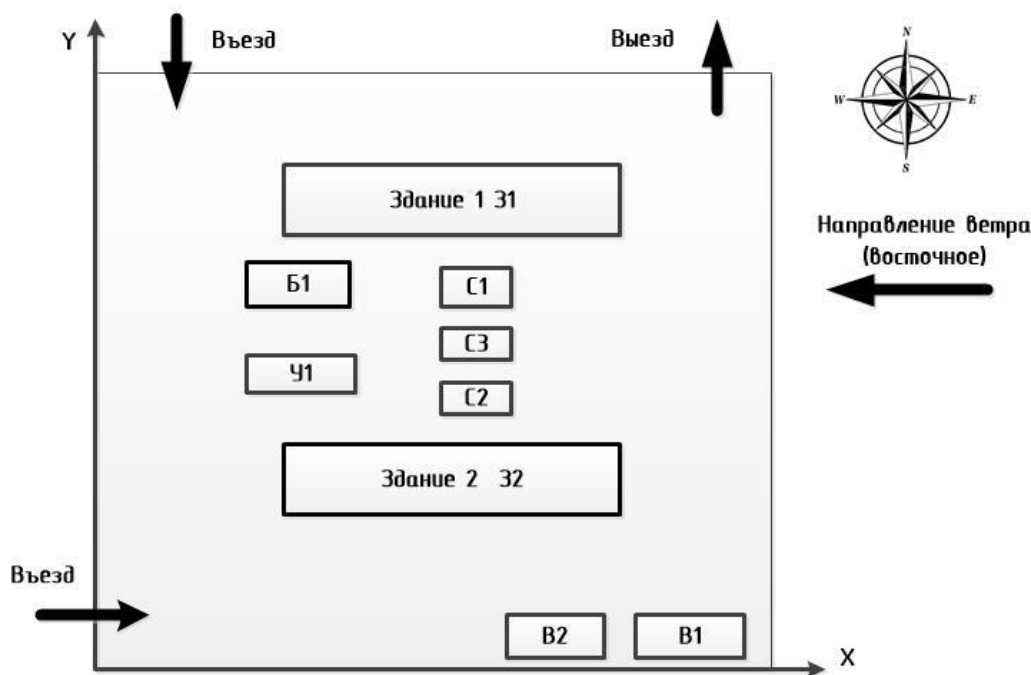


Рис. 5. – Оптимизированный план строительной площадки

Для наглядности преимущества предлагаемого метода, в этом исследовании также был рассмотрен первоначальный план строительной площадки, представленной на рис. 6, составленный подрядчиками.

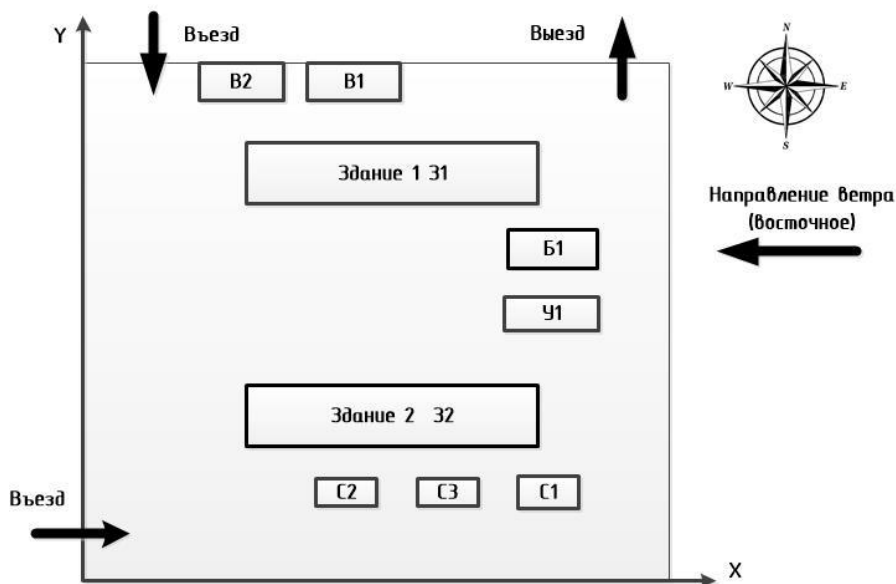


Рис. 6. – Первоначальный план строительной площадки

Сравнительные характеристики первоначального плана площадки и оптимизированного представлены в таблице №4. Результаты показывают, что по показателям концентрации пылевого загрязнения и стоимости внутриплощадочных перевозок оптимизированный план лучше.

Таблица № 4

Сравнение воздействия строительной пыли и стоимости транспортировки

Планировка строительной площадки	Показатели целевых функций	
	F <sub>1</sub> , мг/м <sup>3</sup>	F <sub>2</sub> , рубли
Первоначальная	5,46	706122,103
Оптимизированная	2,15	393289,76

Оптимизированный план строительной площадки, разработанный с применением алгоритма МРЧ, дает оптимальные значения для решения поставленных задач в данном исследовании. Средняя концентрация пылевого загрязнения, которой будут подвержены строители, составит 2,15 мг/м<sup>3</sup>, а совокупная стоимость внутриплощадочных перевозок на строительной площадке составит 393289,76 рублей.

## Литература

1. Миличева Н.Н., Саблина А.Н. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов в атмосферный воздух, применимые в различных отраслях промышленности, Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300).

2. Genikhovich E.L., Gracheva I.G, Onikul R.L., Filatova E.N. Air-pollution modelling at an urban scale – Russian experience and problems Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2002. V. 2., №5-6. pp. 501-512.

3. Revich B.A., Sidorenko V.N. Human Health Damage from Environmental Pollution. Bulletin «Towards a Sustainable Russia», 2006. № 35. URL: [ecologyandculture.ru/upload/File/Bull\\_35en.pdf](http://ecologyandculture.ru/upload/File/Bull_35en.pdf).

4. Барикаева Н.С., Николенко Д.А. Мониторинг пылевого загрязнения атмосферного воздуха городской среды на примере г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 50. С. 182-189. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=32321718](http://elibrary.ru/item.asp?id=32321718).

5. Петренко Л.К., Буц А.А. Природные компоненты проектирования реконструкции и инженерная подготовка // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. - URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_155\\_Petrenko\\_N.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_155_Petrenko_N.pdf).

6. Николенко Д.А., Васильев А.Н., Иванова Ю.П., Сахарова А.А., Иванова О.О., Азаров В.Н., Чернущенко А.А. О влиянии градостроительных решений и зеленых газозащитных зон на качество воздушной среды примагистральных территорий // Инженерный вестник Дона. 2022. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7441](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7441).

7. Петренко Л. К., Саркисян А. А. К вопросу о преимуществах и недостатках субподрядного метода ведения работ в строительстве// Инженерный вестник Дона, 2017. № 4. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4429](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4429).

---

8. Azarov V. N., Barikaeva N. S. and Solovyeva T. V. 2016 Monitoring of fine particulate air pollution as a factor in urban planning decisions Procedia Engineering (Amsterdam: Elsevier) 150. pp 2001-2007.

9. Васильев А.Н., Козловцева Е.Ю., Гараев А.Л. Исследование загрязнения мелкодисперсной пылью PM10 и PM2.5 воздушной среды города Волгограда // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6313.

10. Kraisman J. Management of the corporation: actual problems of modernity Washington, DC. 2002. - 560 p.

11. Иванова Ю. П., Соколова Е. В., Сахарова А.А., Иванова О.О., Азаров В.Н. Проверка выполнения закона Вейбулла для различных направлений ветра, характерных для линейного города Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 3(80). С. 134-141.

12. Иванова Ю.П., Соловьева Т.В., Дериченко А.В., Боженкова А.С., Маркин В.С., Азаров В.Н. Влияние транспортных магистралей на формирование шума в городской среде и способы его снижения // Инженерный вестник Дона, 2020, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257.

### References

1. Milicheva N.N., Sablina A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300.

2. Genikhovich E.L., Gracheva I.G, Onikul R.L., Filatova E.N. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2002. V. 2., №5-6. pp. 501-512.

3. Revich B.A., Sidorenko V.N. Bulletin «Towards a Sustainable Russia», 2006. № 35. URL: ecologyandculture.ru/upload/File/Bull\_35en.pdf.



4. Barikaeva N.S., Nikolenko D.A. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2017. № 50. pp. 182-189. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=32321718](http://elibrary.ru/item.asp?id=32321718).

5. Petrenko L.K., Buc A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_155\\_Petrenko\\_N.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_155_Petrenko_N.pdf).

6. Nikolenko D.A., Vasil'ev A.N., Ivanova Yu.P., Sakharova A.A., Ivanova O.O., Azarov V.N., Chernushchenko A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7441](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7441).

7. Petrenko L. K., Sarkisyan A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4429](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4429).

8. Azarov V. N., Barikaeva N. S. and Solovyeva T. V. 2016 Monitoring of fine particulate air pollution as a factor in urban planning decisions Procedia Engineering (Amsterdam: Elsevier) 150. pp 2001-2007.

9. Vasil'ev A.N., Kozlovtseva E.Yu., Garaev A.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6313](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6313).

10. Kraisman J. Management of the corporation: actual problems of modernity Washington, DC. 2002. 560 p.

11. Ivanova YU. P., Sokolova E. V., Saharova A.A., Ivanova O.O., Azarov V.N. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. 2020. № 3(80). pp.134-141.

12. Ivanova YU.P., Solov'eva T.V., Derichenko A.V., Bozhenkova A.C., Markin V.S., Azarov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2020/6257).

**Дата поступления: 24.12.2023**

**Дата публикации: 8.02.2024**