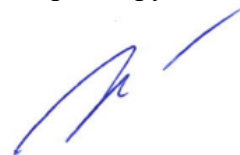


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Накаряков Евгений Вадимович

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ КАМЕР  
БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ  
РУД БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук  
Левин Лев Юрьевич

Пермь 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 6  |
| 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....  | 13 |
| 1.1 Анализ схем проветривания выемочных единиц при применяемых системах разработки.....  | 15 |
| 1.1.1 Сплошная слоевая система разработки .....  | 15 |
| 1.1.2 Камерная система разработки вкрапленных руд.....   | 20 |
| 1.1.3 Камерно-целиковая система разработки.....  | 21 |
| 1.1.4 Камерная система разработки панельных целиков .....  | 23 |
| 1.2 Факторы, влияющие на процесс проветривания тупиковых камер.....  | 24 |
| 1.2.1 Способы проветривания тупиковых горных выработок .....   | 24 |
| 1.2.2 Санитарно-гигиенические нормы .....  | 24 |
| 1.2.3 Эффективность использования свежего воздуха .....  | 25 |
| 1.3 Модели, используемые при исследовании процессов проветривания горных выработок .....   | 26 |
| 1.3.1 Математическое моделирование.....  | 26 |
| 1.3.2 Численное трехмерное моделирование .....   | 29 |
| 1.3.3 Численные методы моделирования турбулентных течений.....   | 34 |
| 1.3.4 Модели турбулентности, применяемые при численном моделировании процесса проветривания методом RANS.....  | 35 |
| 1.4 Цели и задачи исследования.....  | 38 |
| 2 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В ИСХОДЯЩЕЙ СТРУЕ ОЧИСТНЫХ ТУПИКОВЫХ КАМЕРООБРАЗНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК.....   | 40 |
| 2.1 Методика проведения экспериментальных измерений качественного состава исходящей струи воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок                                      | 40 |
| 2.1.1 Этапы измерений .....  | 40 |
| 2.1.2 Технологические режимы проведения натуральных измерений .....  | 41 |
| 2.1.3 Измеряемые параметры.....  | 42 |
| 2.1.4 Измерение качественного состава выхлопных газов машин .....  | 42 |
| 2.1.5 Схема проведения измерений .....   | 46 |
| 2.1.6 Проведение измерений параметров режима проветривания и оборудование для измерений.....   | 47 |
| 2.2 Результаты экспериментальных измерений качественного состава исходящей струи воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель»..... | 49 |
| 2.2.1 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 10-9-1 на руднике «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель».....                      | 49 |

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 2.2.2 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 10-8-2 на руднике «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....              | 52        |
| 2.2.3 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 1-1-1 на руднике «Комсомольский» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....            | 55        |
| 2.2.4 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-02-69з-1 на руднике «Комсомольский» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....     | 58        |
| 2.2.5 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-11-15-НА_3 на руднике «Маяк» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....            | 59        |
| 2.2.6 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-ЗД-2С на руднике «Маяк» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....                 | 62        |
| 2.2.7 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 11_7-1 на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....             | 63        |
| 2.2.8 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-12_15-2 (2ст.) на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» ..... | 66        |
| 2.2.9 | Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 3-17-1 на руднике «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель» .....               | 68        |
| 2.3   | Анализ графика работы машин .....   | 70        |
| 2.4   | Анализ концентраций вредных веществ в исходящей струе .....   | 70        |
| 2.5   | Выводы по главе .....   | 72        |
| 3     | <b>РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ОЧИСТНОЙ ТУПИКОВОЙ КАМЕРООБРАЗНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ С ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К НЕЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКОЙ .....</b>                | <b>73</b> |
| 3.1   | Математическая постановка задачи эффективности проветривания тупиковой камеры большого сечения .....  | 73        |
| 3.2   | Численный расчет процесса проветривания тупиковой камеры большого сечения .....   | 74        |
| 3.3   | Параметрическое обеспечение модели .....  | 76        |
| 3.3.1 | Геометрическая модель .....   | 76        |
| 3.3.2 | Граничные условия .....   | 77        |
| 3.3.3 | Исследование влияния коэффициента шероховатости стенок горной выработки .....   | 77        |
| 3.3.4 | Критерий Куранта-Фридрихса-Леви (исследование влияния размерности расчетной сетки и временного шага) .....  | 79        |
| 3.3.5 | Исследование влияния теплоты .....  | 79        |
| 3.4   | Валидация численной модели на основании натуральных исследований .....  | 85        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.4.1 | Валидация численной модели очистной камеры 1-1-1 рудника «Комсомольский» .....  | 86  |
| 3.4.2 | Валидация численной модели очистной камеры 11_7-2 рудника «Октябрьский» .....   | 90  |
| 3.4.3 | Валидация численной модели очистной камеры КАМ-11-15-НА_3 рудника «Маяк» .....  | 94  |
| 3.4.4 | Валидация численной модели очистной камеры 3-17-1 рудника «Скалистый» .....   | 98  |
| 3.5   | Выводы по главе .....   | 103 |
| 4     | <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОВЕТРИВАНИЕ ОЧИСТНОЙ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ – КАМЕРЫ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ</b> .....  | 104 |
| 4.1   | Исследование влияния геометрических параметров очистной тупиковой камерообразной горной выработки на процесс выноса из очистного пространства вредных веществ выхлопных газов самоходного горно-шахтного оборудования с двигателем внутреннего сгорания ..... | 104 |
| 4.1.1 | Конфигурация поперечного сечения .....  | 104 |
| 4.1.2 | Длина камерного пространства .....  | 107 |
| 4.1.3 | Величина развала руды .....   | 110 |
| 4.2   | Исследование влияния аэродинамических параметров проветривания на процесс выноса вредных веществ выхлопных газов самоходного горно-шахтного оборудования с двигателем внутреннего сгорания из очистного пространства .....                                    | 117 |
| 4.2.1 | Исследование влияния скорости воздушного потока .....   | 118 |
| 4.2.2 | Исследование влияния отставания вентиляционного трубопровода от устья очистной камеры .....   | 120 |
| 4.3   | Исследование влияния производственного цикла .....  | 125 |
| 4.4   | Исследование влияния качественного состава рудничной атмосферы, подаваемой на проветривание .....   | 127 |
| 4.5   | Комплексный анализ влияния различных факторов .....   | 132 |
| 4.6   | Выводы по главе .....   | 134 |
| 5     | <b>ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТУПИКОВЫХ КАМЕР</b> .....  | 135 |
| 5.1   | Методика расчета требуемого количества воздуха и организации проветривания тупиковых камерообразных горных выработок .....  | 135 |
| 5.1.1 | Расчет требуемого количества воздуха .....  | 136 |
| 5.1.2 | Расчет максимального времени работы машины по отгрузке руды из очистного пространства .....   | 137 |
| 5.1.3 | Реализация разработанной методики в аналитическом комплексе «Аэросеть» .....  | 138 |
| 5.2   | Регламентное обеспечение безопасности .....   | 139 |
| 5.2.1 | Обоснование безопасности .....  | 139 |
| 5.2.2 | Автоматическая замерная станция .....   | 145 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 5.2.3  | Регламент технологических производственных процессов ..... | 147 |
| 5.3  | Экономический эффект применения результатов работы .....   | 149 |
| 5.4  | Выводы по главе .....                                      | 154 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  |  | 155 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....   |  | 156 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ<br>КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ИСХОДЯЩЕЙ СТРУИ ВОЗДУХА ИЗ ОЧИСТНЫХ<br>ТУПИКОВЫХ КАМЕРООБРАЗНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА РУДНИКАХ ПАО<br>«ГМК «НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ» ..... |  | 166 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы диссертации**

При отработке полезных ископаемых рудных месторождений наиболее применим буровзрывной способ выемки, который подразумевает использование энергии взрыва для отрыва породы от массива. Погрузка взорванной горной массы производится самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания, что обеспечивает высокую скорость доставки добытой породы и, как итог, высокую производительность и экономическую эффективность. Несмотря на постоянно совершенствующиеся технологии очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, объем поступающих в рудничную атмосферу вредных примесей, содержащихся в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания, достаточно высок. При работе самоходного оборудования с двигателем внутреннего сгорания (далее по тексту – ДВС) в подземных горных выработках существует вероятность загрязнения рудничной атмосферы до значений концентраций выше предельно-допустимых, что влечет за собой необходимость эффективного проветривания, обеспечивающего безопасные условия труда горнорабочих. Газовый состав воздуха в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС зависит от организации проветривания выработок. Для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС необходимо подавать в выработки достаточное количество свежего воздуха для разжижения до предельно-допустимых концентраций газов. Недостаточность свежего воздуха в подземных горных выработках при работе в них самоходного оборудования с ДВС приводит к превышению предельно-допустимых концентраций ядовитых газов в атмосфере выработки, что в свою очередь влечет за собой невозможность ведения горных работ в выработке.

Одной из актуальных проблем рудничной вентиляции является организация проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения, образующихся за счет расширения подготовительной нарезной выработки, при производстве процесса отгрузки взорванной горной массы из очистной выработки самоходным горно-шахтным оборудованием с ДВС.

Большой вклад в исследование проветривания выработок большого сечения внесли Медведев И.И. и Красноштейн А.Е. [43]. Коллектив авторов выделил принципиальное отличие процесса проветривания камер от выработок малого сечения – наличие больших масс свежего воздуха в камере и небольшие скорости его движения

создают условия, при которых градиент концентрации сохраняется более длительное время и обеспечивается диффузный перенос вещества. Аэрогазодинамика очистных камер на примере сланцевых рудников исследовалась Лайгна К.Ю. На основе теории локальной турбулентности им найдены коэффициенты продольной и поперечной турбулентной диффузии круглых и плоских струй при различных коэффициентах стеснения [35,36,37,38,39]. Казаков Б.П., Файнбург Г.З., Шалимов А.В. проводили исследования условий проветривания тупиковых выработок, в том числе и большого сечения. Ими определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения [10]. Также установили, что процесс проветривания тупиковой выработки происходит медленнее, чем это описывает модель идеального смешения, ввиду присутствия в структуре воздушных потоков отдельных вихрей и застойных зон с пониженным массообменом с другими потоками [66,67]. В работах Качурина Н.М. проведены исследования проветривания выработок большого поперечного сечения в том числе и тоннелей и установлено, что моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании выработок большого поперечного сечения основывается в общем случае на системе уравнений Рейнольдса, описывающей течение вязкого, сжимаемого теплопроводного газа в трехмерной постановке [21,22,23,24]. Исследования, выполненные в математической модели тупиковой выработки, Пьянниковым В.П. и Росляковым А.С. показали, что циклическое использование комбинирования всасывающего и нагнетательного способа проветривания с учетом направления движения техники по выработке позволяет нормализовать санитарно-гигиенические условия труда в основном участке тупиковой выработки при работе техники с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание [53]. Также доказано, что проветривание призабойной зоны двумя последовательными струями позволяет снизить количество необходимого для проветривания призабойной зоны свежего воздуха в 2,8 раза [54,55,56]. Козыревым С.А. и Амосовым П.В. проводилось численное трехмерное моделирование условий проветривания тупиковой выработки. В частности, ими доказано, что при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок после проведения взрывных работ имеется возможность, по сравнению с требованиями правил безопасности, увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб с соблюдением нормативного времени на проветривание за счет роста расхода воздуха [28]. Исследования проветривания тупиковых и сквозных выработок по фактору разжижения взрывоопасных газов, выполненные Калединой Н.О. и Кобылкиным С.С., базируются на применении численного трехмерного моделирования [16,17,18,19,20,98].

Кобылкиным А.С. неоднократно использовалось численное моделирование для решения задач эффективности проветривания подземных горных выработок по фактору разжижения выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания [26,27]. Левиным Л.Ю., Газизуллиным Р.Р. и Семиным М.А. использовалось численное трехмерное моделирование для решения задач проветривания тупиковых выработок большого сечения. Ими определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения, в том числе места наилучшего расположения эжекторных установок для проветривания тупиковых камер большого сечения беструбным способом [40].

Авторами так или иначе рассмотрены вопросы моделирования проветривания тупиковых горных выработок, однако подробных исследований процесса проветривания тупиковых камерообразных горных выработок длиной более 10 м нет. Данный факт указывает на актуальность исследования условий проветривания и разработки методики расчета и организации проветривания тупиковых очистных камер при отгрузке руды техникой с ДВС.

### **Цель работы**

Разработка безопасных параметров проветривания при отработке запасов тупиковыми очистными камерами буровзрывным способом в условиях изменяющегося объема камерного пространства и развала горной массы.

### **Основная идея работы**

Обоснование способа и параметров проветривания тупиковых камер на основе численного трехмерного моделирования с учетом сложной геометрии камеры и нестационарности источников газовыделений.

### **Основные задачи работы**

1. Провести анализ имеющейся литературы по данной тематике, изучить основные принципы и закономерности образования и переноса газоздушных примесей в выработках.
2. Разработать программу проведения натурных измерений и исследовать в условиях действующих рудников процессы газовыделений самоходного горно-шахтного оборудования с двигателями внутреннего сгорания.
3. Разработать и параметризовать математическую модель проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки



взорванной горной массы самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания.

4. Провести многопараметрическое моделирование процесса проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы с целью выявления факторов влияния на процесс проветривания тупиковых камер.
5. Осуществить корректировку аналитической модели выноса газов в тупиковой выработке с учетом камерного пространства.
6. Разработать методику расчета и организации проветривания протяженных тупиковых очистных камер.

### **Методы исследований**

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования проветривания тупиковых очистных камер, численное и аналитическое моделирование проветривания, статистическую обработку результатов экспериментальных измерений и численных расчетов, физический и статистический анализ результатов моделирования и экспериментов.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

- Параметризованная численная модель динамики газовой смеси в тупиковых камерах большого сечения с учетом сложной геометрии и нестационарного характера газовыделений позволяет рассчитывать процессы выноса и накопления газов в камерном пространстве.
- Зависимости динамики концентрации газов в рабочей зоне от параметров технологического процесса отгрузки горной массы с учетом цикличности работы горной техники в выработке, позволяющие определять параметры ее проветривания и организации горных работ.
- Методика расчета и организации проветривания тупиковых очистных камер, учитывающая максимальное время работы машины по отгрузке, позволяет обеспечить безопасные условия ведения горных работ и сократить издержки на подготовительные работы в пределах панелей.

### **Научная новизна**

1. Определены закономерности временной динамики концентраций вредных примесей выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания при

нестационарной работе дизельной техники в камерах большого сечения в условиях изменяющегося объема развала горной массы.

2. Установлено, что при проветривании тупиковых камер большого сечения формируются два принципиально разнопроветриваемых объема камеры: в пространстве до развала горной массы происходит конвективно-диффузионный перенос газа в воздушной среде за счет кинетической энергии вентиляционной струи, выходящей из воздуховода; в пространстве за развалом происходит диффузионный перенос газа в воздушной среде.
3. Предложена аналитическая формула для определения максимального времени нахождения машины в пространстве камеры во избежание превышения предельно-допустимой концентрации в рабочей зоне горнорабочего в зависимости от параметров газовыделения и параметров проветривания.

#### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в шахтных условиях, положительными результатами верификации валидации разработанных моделей, положительными результатами реализации предложенных решений на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель»..

#### **Практическое значение и реализация результатов работы**

Полученные результаты исследований позволили оптимизировать применяемые системы разработки ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в части применения тупиковых камер длиной до 60 м.

Научное обоснование возможности проветривания тупиковых камер длиной до 60 м отражено в разработанных Обоснованиях безопасности Опасного производственного объекта. На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.

Результаты работы включены в Регламент технологических производственных процессов «Проветривание горных выработок в подземных условиях подразделений ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

## **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Исследования по теме диссертационной работы поддержаны Российским научным фондом и Российским фондом фундаментальных исследований в рамках выполнения трех проектов:

- РНФ 19-77-30008 «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов»;
- РФФИ 19-15-50125 «Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников»;
- РФФИ 20-45-596020 р\_НОЦ\_Пермский край «Исследование динамики гигроскопического аэрозоля калийно-магниевых солей в атмосфере горных выработок калийных рудников».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 г.), а также согласно Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук по проекту «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер ЦИТИС 122012000396-6).

## **Апробация работы**

Научные положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ГИ УрО РАН «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, 2019 г., 2023 г.), на всероссийской научной конференции «Горняцкая смена – 2019» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2019 г.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2019 г.), на конференции международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, ИПКОН РАН, 2022 г.).

## **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в шахтных условиях, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка

научных решений и их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов ПАО «ГМК «Норильский никель»: Дарбиняна Т.П., Мизонова Е.Н., Мышкина П.И., Кудленко И.Н. и других.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю чл.-кор. РАН, д.т.н. Левину Л.Ю. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Зайцеву А.В. и д.т.н. Жихареву С.Я. за консультации и ценные указания, д.т.н. Семину М.А. и к.т.н. Гришину Е.Л. за помощь в выполнении работы. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка коллег.

### **Публикации**

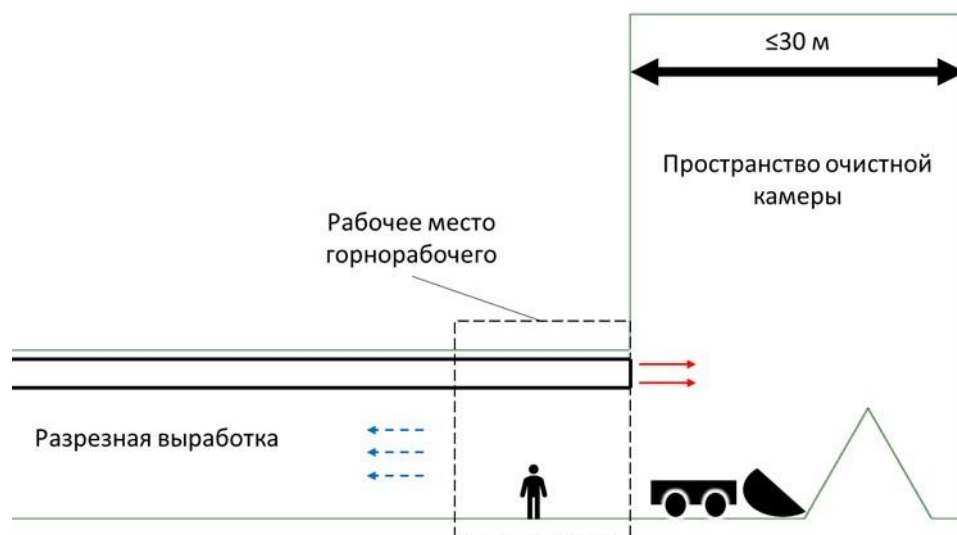
По теме диссертационной работы подготовлено и опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК, 5 в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

### **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 21 таблицу. Список использованных источников состоит из 153 наименований, в том числе 82 зарубежных.

## 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В российской нормативной документации [68] описан ряд требований по проветриванию тупиковых горных выработок месторождений твердых полезных ископаемых. Согласно п. 160, действующие выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха, за исключением тупиков длиной до 10 м, проветриваемых за счет диффузии. А согласно п. 182, расстояние от конца нагнетательного трубопровода до забоя не должно превышать 10 м при площади сечения забоя не более  $16 \text{ м}^2$ , а при площади сечения забоя более  $16 \text{ м}^2$  – 15 м. Однако выполнение этих требований в ряде случаев может быть существенно затруднено, – например, для камерообразных выработок, образующихся за счет расширения разрезной выработки при обратном порядке отработки (рисунок 1.1).



**Рисунок 1.1 – Тупиковая очистная камерообразная горная выработка, образующаяся за счет расширения разрезной выработки, с указанием рабочего места горнорабочего**

В данной ситуации длина тупиковой камеры может существенно превышать 10 м, однако при этом технически нет возможности проложить вентиляционный трубопровод в саму камерообразную выработку. Это связано с тем, что забой располагается не в конце, а в начале камерообразной выработки, а значит при проведении буровзрывных работ отбитая горная масса при падении повредит проложенный под забоем вентиляционный трубопровод. Эффективным решением указанной проблемы невозможности прокладки трубопровода в выработанном пространстве камерообразной выработки является разработка специального технологического регламента по проветриванию таких тупиковых выработок, в котором обосновывается правомерность отступления от п. 182 Правил безопасности. Дополнительным и важным нюансом здесь является и нестандартное положение рабочего места машиниста – оно находится не в

тупиковой выработке, а в устье камерного пространства (рисунок 1.1). Машинист при этом осуществляет управление техникой с помощью пульта дистанционного управления.

В исследования проветривания тупиковых выработок по газовому фактору в классической литературе внес большой вклад В.Н. Воронин [4]. Им определены основные закономерности вынесения газового и пылевого облака из тупиковых горных выработок. Им доказано, что зависимость концентрации газа либо пыли в тупиковой горной выработке от времени имеет экспоненциальный характер. Им введено понятие коэффициента турбулентной диффузии. Показано, что, если выходное отверстие вентиляционного трубопровода расположено на расстоянии равном дальнобойности струи, когда струя работает с максимальной работоспособностью, коэффициент турбулентной диффузии имеет максимальное значение. В практических же условиях отставание труб от забоя, обеспечивающее максимальную работоспособность струи, не выдерживается. При удалении выходного отверстия вентиляционного трубопровода от забоя на расстояние, большее дальнобойности струи, коэффициент турбулентной диффузии уменьшается. Область исследования коэффициента турбулентной диффузии ограничивалась районом максимальной работоспособности воздушной струи.

Для определения динамики концентрации газов в газозвушной смеси Ворониным предложена [4] и с различными модификациями до настоящего времени используется [10,62,63,64] простая балансовая модель:

$$C(t) = C_{max} \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{V} \cdot t}, \quad (1.1)$$

где  $C(t)$  – зависимость изменения концентрации газа от времени  $t$ ;  $C_{max}$  – максимально возможная концентрация газа;  $k_T$  – коэффициент турбулентной диффузии струи;  $Q$  – количество воздуха, подаваемого на проветривание;  $V$  – проветриваемый объем тупиковой выработки.

Данная модель классически включает понятие «коэффициент турбулентной диффузии струи», которое не совпадает с общепринятым термином коэффициента турбулентной диффузии в гидрогазодинамике. Параметр  $k_T$  определяется как отношение средней концентрации примеси в сечении ядра постоянной массы струи к концентрации на границе струи [2,42]. Для расчетов параметра  $k_T$  в зависимости от диаметра трубопровода и его удаленности от забоя предложены специальные таблицы [21], но на практике распространено использование эмпирических значений, лежащих в интервале от 0,2 до 1,0. Во избежание одинаковых названий коэффициентов турбулентной диффузии из гидрогазодинамики в настоящей работе данный коэффициент назван «коэффициентом эффективности проветривания».

При работе в тупиковой горной выработке погрузочно-доставочной машины увеличение концентрации газа имеет экспоненциальный характер и достигает асимптоты, которая по данным исследований «Уральского федерального университета» в работах [53,54,55,56] определяется выражением:

$$C_{max} = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q}, \quad (1.2)$$

где  $g_{ex}$  – объемный расход выхлопных газов машины;  $C_{ex}$  – концентрация вредных компонентов в выхлопных газах машины.

### **1.1 Анализ схем проветривания выемочных единиц при применяемых системах разработки**

Существующий подход к отработке запасов рудных месторождений подразумевает добычу выемочными единицами, проветриваемыми за счет общешахтной депрессии. Что влечет за собой проходку большого количества подготовительных выработок, предназначенных исключительно для организации сквозного проветривания. При этом в случае перевода выемочных единиц в разряд тупиковых, проветриваемых ВМП, существует возможность сокращения большого количества подготовительных выработок.

В разделе приведен анализ систем разработки, оптимизация которых возможна за счет перевода очистных выработок в разряд тупиковых, а также увеличения их длины.

На рудниках Талнахского рудного узла применяются следующие системы разработки [8]:

- сплошная слоевая;
- камерно-целиковая;
- сплошная камерная.

#### **1.1.1 Сплошная слоевая система разработки**

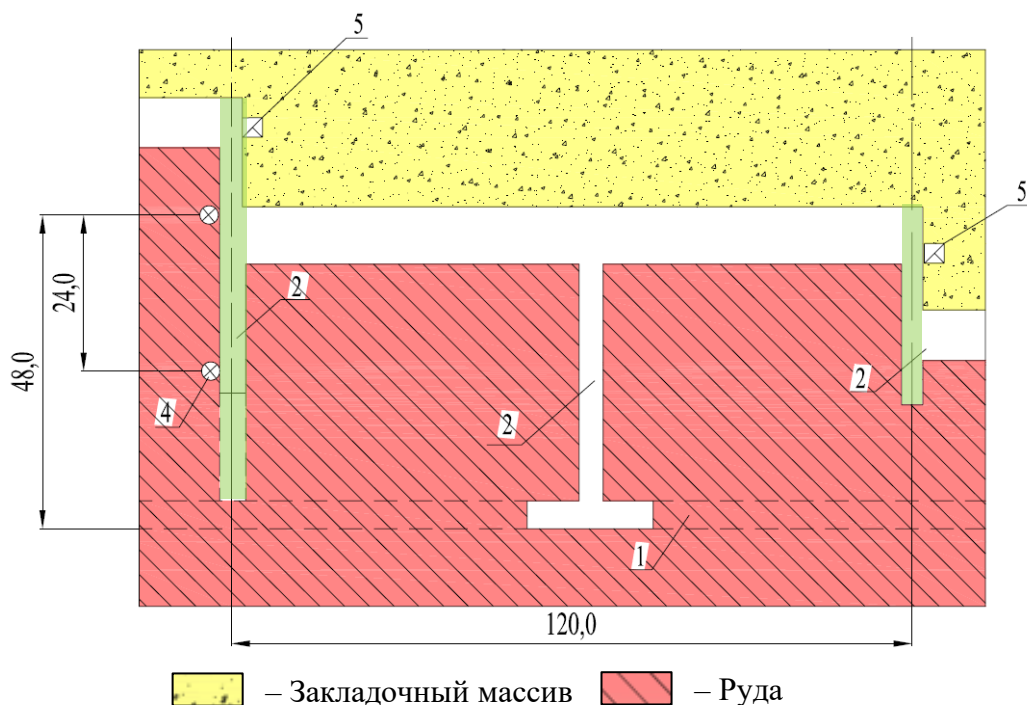
При сплошной слоевой системе разработки часть рудного тела разделяют на панели, панели на вертикальные ленты. Каждую ленту по вертикали делят на горизонтальные слои. Слои отрабатываются снизу вверх с оставлением между кровлей слоя и закладкой свободного технологического пространства.

При данной системе разработки ширина очистных выработок составляет 8-10 м. Длина ленты – 120 м. Высота очистных выработок выбирается с учетом нарушенности руд: для руд слабой и средней нарушенности – до 12 м, для руд сильной нарушенности – до 10 м, для руд весьма сильной нарушенности – до 6 м. В пределах выемочного участка находится 12 слоев (при ширине слоя 10 м).

В зависимости от горно-геологических условий залегания рудного тела применяются различные схемы подготовки панели: фланговыми уклонами, уклонами по почве рудного тела и транспортными штреками.

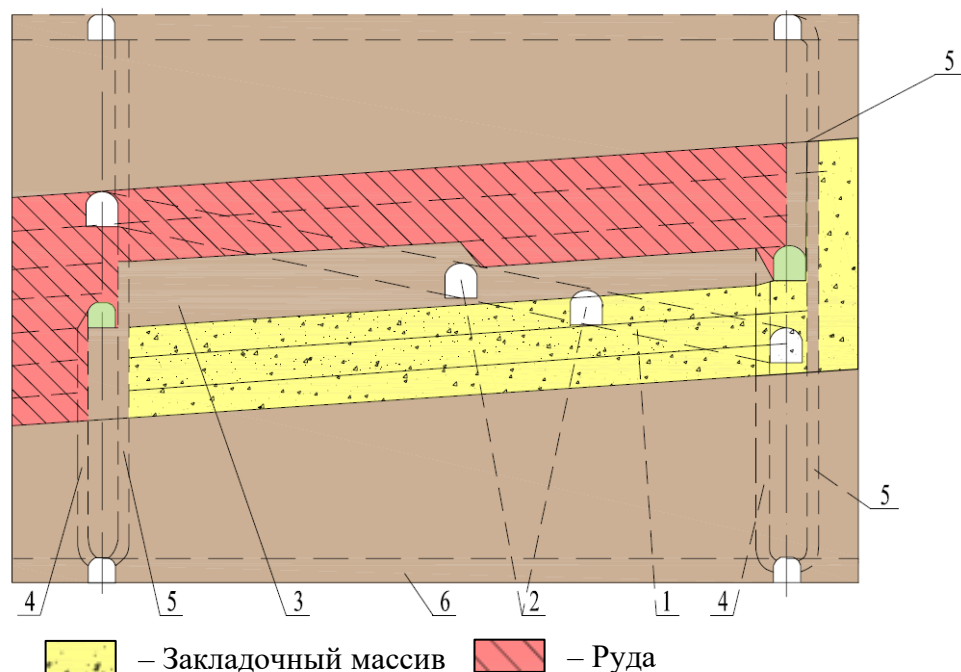
### Схема подготовки панели фланговыми уклонами

Схема подготовки фланговыми уклонами применяется в условиях пологого падения рудной залежи, не осложненной значительными тектоническими нарушениями (рисунки 1.2, 1.3).



**Рисунок 1.2 – Схема подготовки панелей фланговыми уклонами (план по почве очистных выработок): 1 – фланговый уклон; 2 – слоевые орты; 4 – рудоспуски; 5 – вентиляционные восстающие**



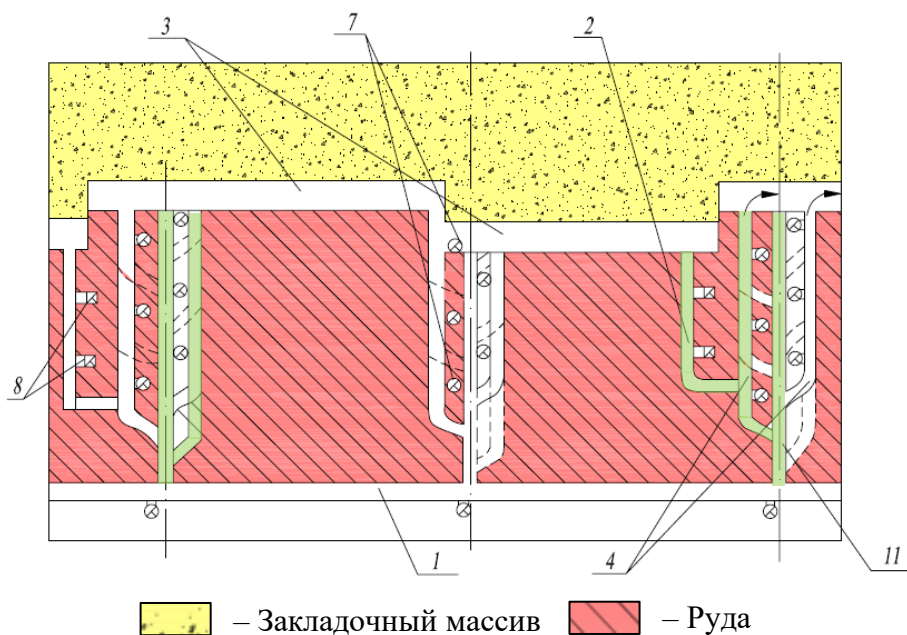


**Рисунок 1.3 – Схема подготовки панелей фланговыми уклонами (поперечный разрез): 1 – фланговый уклон; 2 – слоевые орты; 3 – очистные забои (слои); 4 – рудоспуски; 5 – вентиляционные восстающие; 6 – откаточный горизонт**

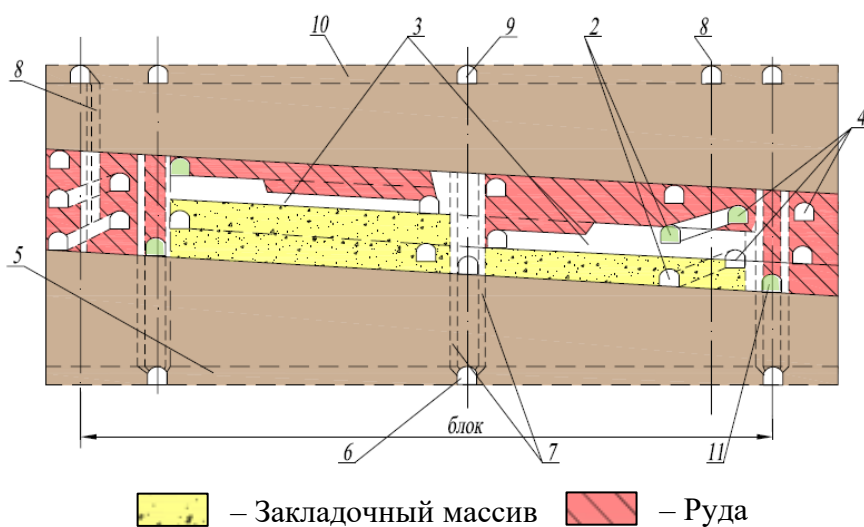
Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка одним подэтажом составляет 264 м. При этом слоевые орты по границе панели длиной 48 м (выделены зеленым цветом на рисунках 1.2, 1.3) проводятся для организации сквозного проветривания.

#### **Схема подготовки панели подготовки уклонами по почве рудного тела**

При углах падения более  $15^\circ$  применяется схема подготовки уклонами по почве рудного тела перпендикулярно фронту работ (рисунки 1.4, 1.5).



**Рисунок 1.4 – Схема подготовки уклонами по почве рудного тела перпендикулярно фронту работ (план по почве очистных выработок): 1 – уклоны по почве рудного тела; 2 – вентиляционные орты; 3 – очистные забои (слои); 4 – слоевые заезды; 8 – вентиляционные восстающие; 11 – транспортный штрек**



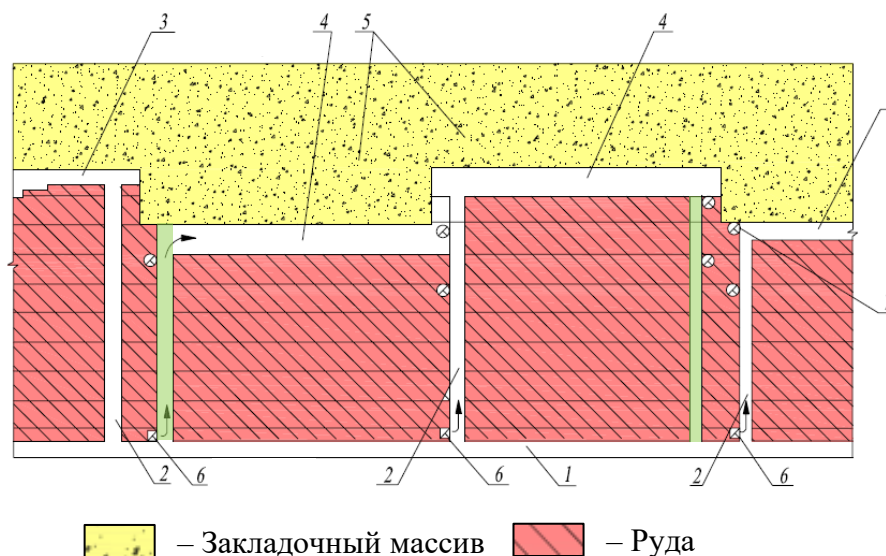
**Рисунок 1.5 – Схема подготовки уклонами по почве рудного тела перпендикулярно фронту работ (продольный разрез по оси очистных выработок): 2 – вентиляционные орты; 3 – очистные забои (слои); 4 – слоевые заезды; 5 – откаточный штрек; 6 – откаточный квершлаг; 7 – рудоспуски; 8 – вентиляционные восстающие; 9 – вентиляционно-закладочный квершлаг; 10 – вентиляционно-закладочный штрек; 11 – транспортный штрек**

Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка одним подэтажом составляет 360 м. При этом слоевые заезды по границам панели длиной 48 м, транспортные штреки по границам панели длиной 48 м и

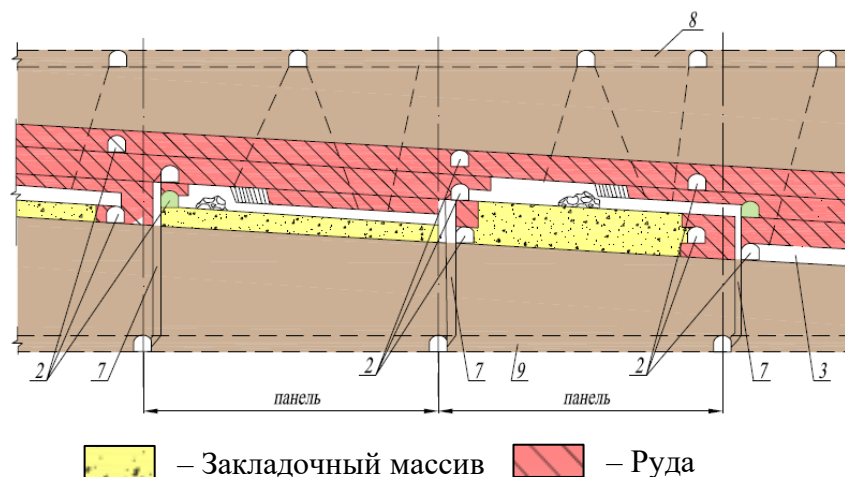
вентиляционные орты длиной 48 м (выделены зеленым цветом на рисунках 1.4, 1.5) проводятся для организации сквозного проветривания.

### Схема подготовки панели транспортными штреками

Схема подготовки транспортными штреками используется при пластообразном и блоковом строении рудной залежи (рисунки 1.6, 1.7).



**Рисунок 1.6 – Схема подготовки транспортными штреками (план по почве очистных выработок): 1 – транспортные штреки; 2 – слоевые заезды; 3 – разрезные штреки; 4 – очистные выработки (слои); 5 – закладочный массив; 6 – вентиляционные восстающие; 7 – рудоспуски**



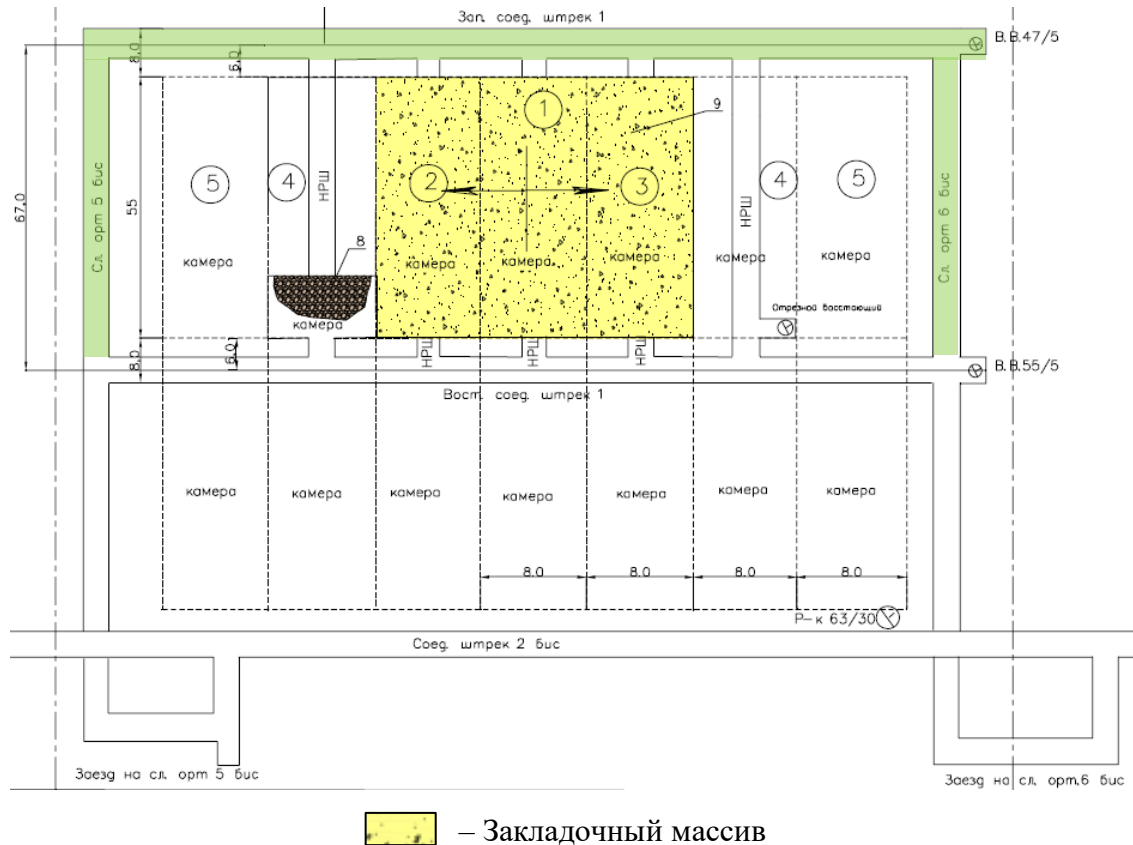
**Рисунок 1.7 – Схема подготовки транспортными штреками (продольный разрез по оси очистных выработок): 2 – слоевые заезды; 3 – разрезные штреки; 7 – рудоспуски; 8 – выработки вентиляционно-закладочного горизонта; 9 – выработки откаточного горизонта**

Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка одним подэтажом составляет 264 м. При этом слоевые заезды по

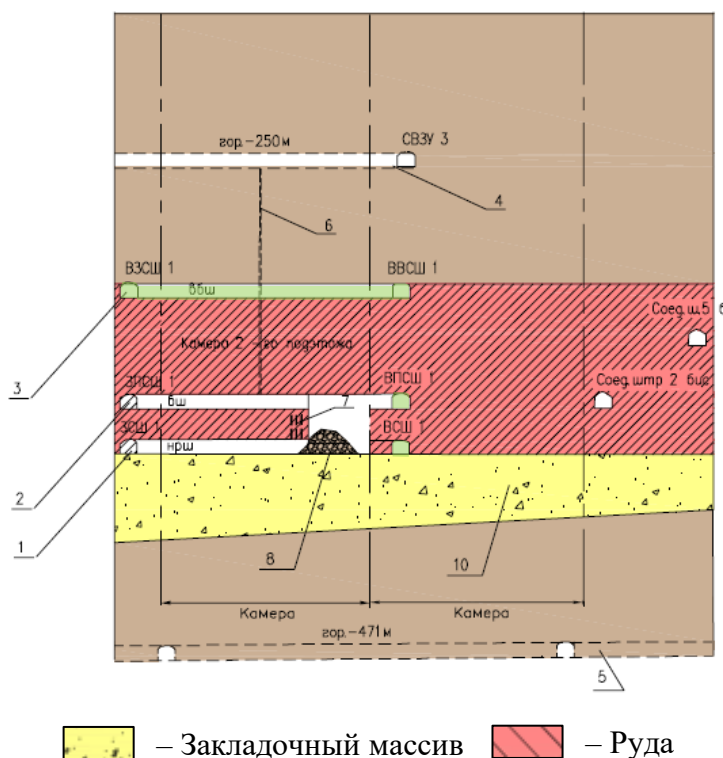
границе панели длиной 48 м (выделены зеленым цветом на рисунках 1.6, 1.7) проводятся для организации сквозного проветривания.

### 1.1.2 Камерная система разработки вмещающих руд

Камерная система разработки применяется для отработки вмещающих руд. Схема отработки выемочного участка показана на рисунке 1.8. Длина камер достигает 55 м, ширина камер – 8 м, высота камер (подэтажа) определяется мощностью рудного тела. В пределах выемочного участка находится 30 камер на одном подэтаже.



**Рисунок 1.8 – План подготовки выемочного участка при отработке вмещающих руд камерно системой разработки: 8 – отбитая руда; 9 – отработанное и заложеное пространство**



**Рисунок 1.9 – Поперечный разрез при отработке вкрапленных руд камерной системой разработки: 1 – выработки 1-го подэтажа; 2 – выработки 2-го подэтажа; 3 – выработки 3-го подэтажа; 4 – выработки вентиляционно-закладочного горизонта; 5 – выработки откаточного горизонта; 6 – закладочные скважины; 7 – скважины для отбойки руды; 8 – отбитая руда; 10 – отработанное и заложённое пространство**

Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка двумя подэтажами составляет 7 074 м. При этом следующие выработки (выделены зеленым цветом на рисунках 1.8 и 1.9) проводятся для организации сквозного проветривания при двух подэтажах:

- соединительный штрек по границе выемочного участка длиной 120 м (3 шт.);
- верхний соединительный штрек по центру выемочного участка длиной 120 м;
- слоевой орт длиной 67 м (8 шт.);
- верхний разрезной штрек верхнего подэтажа длиной 67 м (30 шт.).

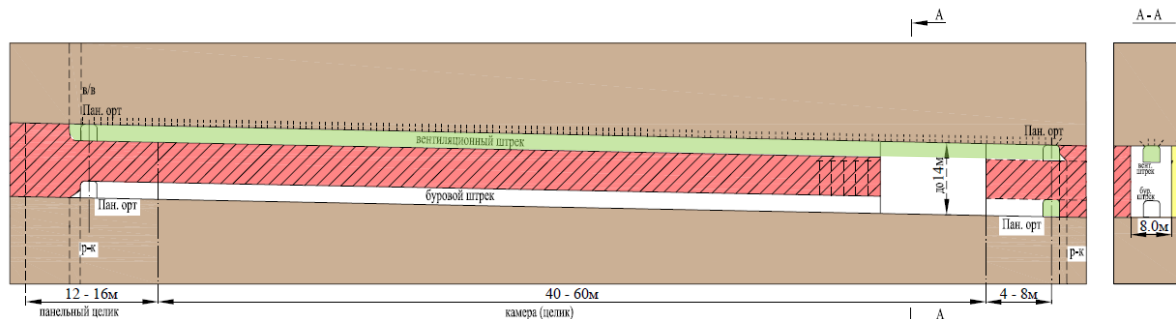
### 1.1.3 Камерно-целиковая система разработки

Камерно-целиковая система разработки подразумевает выемку руды с оставлением временных рудных, рудобетонных и бетонных целиков. Зона ведения очистных работ до 80 м. Ширина камер определяется нарушенностью пород: при средней нарушенности не более 12 м, при сильной нарушенности – 8 м. В зависимости от мощности рудного тела производится (более 20 м) или не производится (менее 20 м)

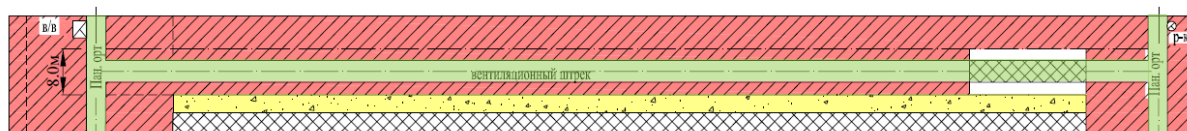
разделение на подэтажи. При ширине камер 8 м в выемочном участке находится 10 выемочных единиц на один подэтаж.

При мощности рудного тела до 20 м (рисунок 1.10) по кровле проходится вентиляционный штрек, по почве – буровой штрек.

### Разрез по оси камеры



### План по кровле



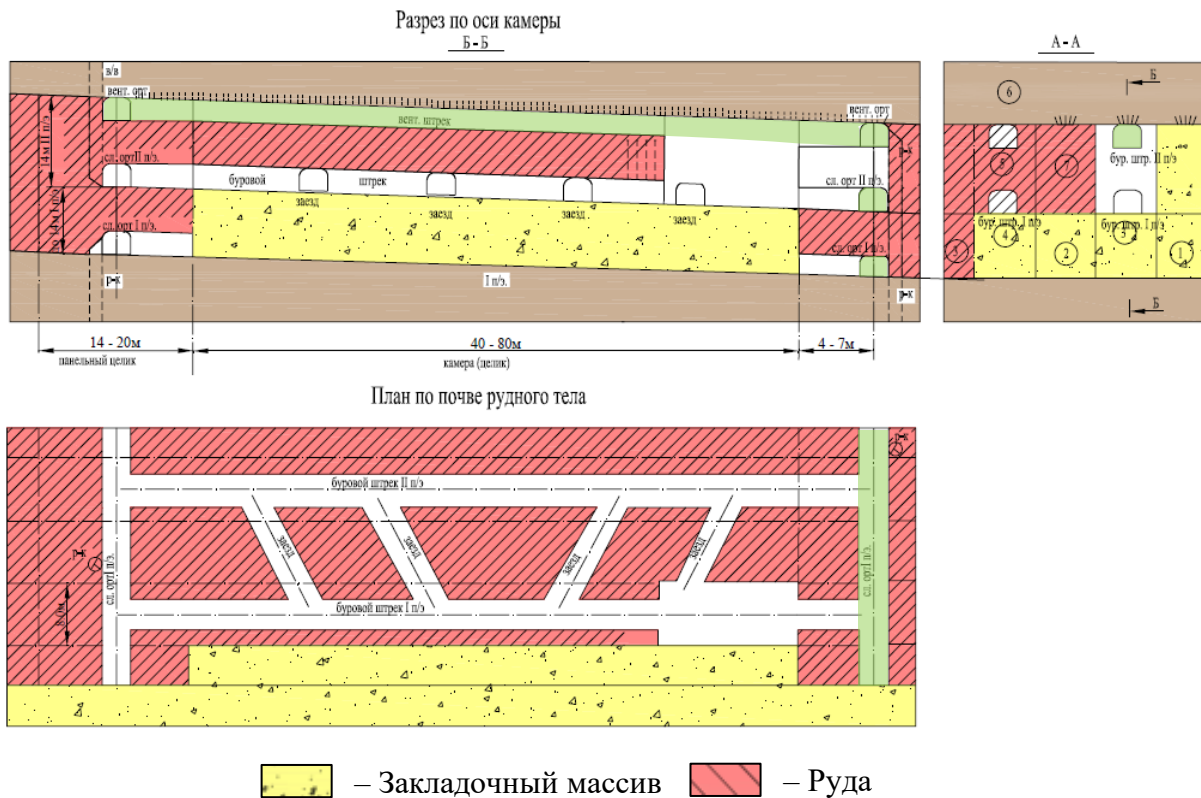
 – Закладочный массив  – Руда

**Рисунок 1.10 – Вариант камерной системы разработки для участка рудного тела мощностью до 20 м**

Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка составляет 1 520 м. При этом следующие выработки (выделены зеленым цветом на рисунке) проводятся для организации сквозного проветривания:

- вентиляционный штрек длиной 60 м (10 шт.);
- панельные орты по кровле рудного тела длиной 80 м (2 шт.);
- панельный орт по почве рудного тела в конце очистной выработки длиной 80 м.

При мощности рудного тела более 20 м запасы в панели (блоке, залежи) разделяются на подэтажи, высота подэтажа при этом не превышает 20 м. Выемка подэтажей ведется сверху вниз либо снизу вверх. Схемы подготовки подэтажа при этом аналогичны. На рисунке 1.11 показан вариант камерной системы разработки с выемкой двух подэтажей снизу вверх для участка рудного тела при мощности более 20 м.



**Рисунок 1.11 – Вариант камерной системы разработки с выемкой двух подэтажей снизу вверх для участка рудного тела мощностью более 20 м**

Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки выемочного участка двумя подэтажами составляет 2 280 м. При этом следующие выработки (выделены зеленым цветом на рисунке 1.11) проводятся для организации сквозного проветривания:

- вентиляционный штрек длиной 60 м (10 шт. для каждого подэтажа);
- вентиляционные орты длиной 80 м (2 шт.);
- слоевой орт I подэтажа в конце очистной выработки длиной 80 м;
- слоевой орт II подэтажа в конце очистной выработки длиной 80 м.

#### **1.1.4 Камерная система разработки панельных целиков**

Отработка панельных целиков осуществляется с разделением на выемочные секции длиной 45-60 м. Каждая секция отрабатывается последовательно двумя камерам шириной 7,5-9 м, ориентированными параллельно оси целика.

Разрезные штреки (орты) проходятся по границе панельных целиков на контакте с породами кровли и почвы. Верхние разрезные штреки служат для организации сквозного проветривания. Нижние разрезные штреки служат для отгрузки руды. Общая длина проводимых горизонтальных (наклонных) выработок для отработки целика составляет 240 м.

## **1.2 Факторы, влияющие на процесс проветривания тупиковых камер**

### **1.2.1 Способы проветривания тупиковых горных выработок**

Классически выделяются три способа проветривания тупиковых выработок с использованием вентилятора местного проветривания и вентиляционного трубопровода: нагнетательный, всасывающий и комбинированный [4,42,43,59,64]. Правила установки вентилятора и отставание трубопровода регламентируются Правилами безопасности [68]. Применительно к тупиковым камерообразным горным выработкам всасывающий способ проветривания мало применим, в связи с запретом нахождения горнорабочих в очистном незакрепленном пространстве.

Существуют способы проветривания тупиковых выработок без использования вентилятора местного проветривания и трубопровода. Основной идеей является разделение тупиковой выработки продольной перемышкой с целью отделения свежей струи воздуха от исходящей [33,51,60]. В связи с постоянным движением техники в нарезной выработке описанный выше метод не применим для проветривания тупиковых камерообразных горных выработок.

### **1.2.2 Санитарно-гигиенические нормы**

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания сжигается топливо. При сжигании образуются ядовитые газы. Основными газообразными компонентами отработанных газов дизельного топлива являются диоксид углерода, кислород, азот, водяной пар, окиси азота и окись углерода. Кроме того, в газовой фазе могут выделяться диоксид серы и различные органические соединения, такие как низкомолекулярные карбонилы, карбоновые кислоты, алканы, алкены и ароматические вещества. Помимо газов и паров, выхлопные газы содержат мельчайшие частицы, которые образуются в процессе сгорания и последующей конденсации соединений газовой фазы. Эти частицы состоят из элементарного углерода, адсорбированных органических соединений, сульфатов, нитратов и следов других элементов.

Согласно пунктам 375, 380, 381 Федеральных Норм и Правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [68] контроль за компонентным составом выхлопных газов техники с ДВС и компонентным составом рудничной атмосферы рабочих зон при работе техники с ДВС осуществляется по содержанию оксида углерода и оксида азота.

Таким образом, при эксплуатации на подземных горных работах техники с ДВС основными контролируемыми вредными компонентами выхлопных газов, согласно



ФНиП [68], являются оксид углерода и оксиды азота, которые приняты в качестве основных исследуемых газов в настоящей работе.

Существующий подход к расчету требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон, в которых работает техника с двигателем внутреннего сгорания, ориентирует на разбавление вредных примесей выхлопных газов ДВС до предельно-допустимых значений, регламентируемых п. 151 ФНиП [68] и таблицей 2.1 СанПиН [58]. Данный подход подразумевает, что во всем пространстве рабочей зоны будет равномерно распределено предельно-допустимое значение газа.

Предельно допустимая концентрация оксида углерода в горных выработках регламентируется Правилами безопасности [68] и составляет 0,0017 % по объему или 20 мг/м<sup>3</sup>.

Предельно допустимая концентрация окислов азота (в пересчете на диоксид азота) в горных выработках регламентируется Правилами безопасности [68] и составляет 0,00026 % по объему или 5 мг/м<sup>3</sup>.

Предельно допустимая концентрация диоксида азота в воздухе рабочей зоны регламентируется Санитарными правилами и нормами для воздуха рабочих зон [58] и составляет 0,0001 % по объему или 2 мг/м<sup>3</sup>.

Предельно-допустимые величины концентраций вредных компонентов выхлопных газов сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Предельно-допустимые концентрации компонентов выхлопных газов

| Газ  | Химическая формула | Предельно-допустимая концентрация |             | Источник    |
|--|--------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
|  |                    | мг/м <sup>3</sup>                 | % по объему |             |
| Оксид углерода                                 | СО                 | 20                                | 0,0017      | ФНиП [68]   |
| Окислы азота (в пересчете на NO <sub>2</sub> ) | NO+NO <sub>2</sub> | 5                                 | 0,00026     | ФНиП [68]   |
| Диоксид азота                                  | NO <sub>2</sub>    | 2                                 | 0,0001      | СанПиН [58] |

### 1.2.3 Эффективность использования свежего воздуха

Показателем эффективности проветривания является эффективность использования свежего воздуха. Под эффективностью использования свежего воздуха принято понимать минимальное и в то же время достаточное количество воздуха для разбавления вредных примесей, т.е. расчет требуемого количества воздуха. Существуют различные подходы к определению минимального количества свежего воздуха, необходимого для обеспечения допустимых концентраций вредных примесей в атмосфере тупиковых выработок при работе в них машин с ДВС. Так в работе

Рослякова А.С. [56] приведен обзор методов расчета требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон с использованием техники с ДВС.

Существуют два способа расчета: 1) основанный на нормативе подачи воздуха по мощности двигателя; 2) основанный на разбавлении вредностей до предельно-допустимых концентраций. Первый способ зачастую используется при проектировании новых участков рудника, второй – при эксплуатации предприятия.

Авторами работы [31] произведено моделирование процесса распространения выхлопных газов при движении дизель-гидравлических локомотивов в угольной шахте. По результатам работы авторы показали, что норматив в  $5 \text{ м}^3/\text{мин}$  на 1 л.с., приводимый в предыдущих редакциях правил безопасности [68], завышен, и может быть снижен до  $3,6 \text{ м}^3/\text{мин}$  на 1 л.с.

Авторами работ [6,34] предложен подход к определению требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон с техникой с ДВС на основании экологического класса двигателя. Так норматив может быть снижен до  $2,14 \text{ м}^3/\text{мин}$  на 1 л.с. при использовании новейших двигателей, соответствующих классам Tier 4 / Stage IV и выше.

Для способа расчета, основанного на разбавлении вредностей до предельно-допустимых концентраций, важно знать максимальную концентрацию вредных примесей, выделяемых техникой с ДВС.

### **1.3 Модели, используемые при исследовании процессов проветривания горных выработок**

Экспериментальные исследования проветривания тупиковых камерообразных горных выработок сопряжены с рядом трудностей, главная из которых – невозможность нахождения человека в очистном пространстве в момент замеров. Наиболее доступным способом изучения этой проблемы является математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

#### **1.3.1 Математическое моделирование**

Большой вклад в исследование проветривания выработок большого сечения внесли Медведев И.И. и Красноштейн А.Е. [43]. Коллектив авторов выделил принципиальное отличие процесса проветривания камер от выработок малого сечения. В выработках малого сечения при небольшом масштабе турбулентности основное значение в выносе примеси имеет конвективная составляющая переноса, и проветривание определяется главным образом турбулентной деформацией. Роль турбулентной диффузии незначительна. Процесс проветривания выработок большого сечения происходит иначе. Малые скорости движения воздуха уменьшают значение

конвективной составляющей переноса, а с увеличением масштаба турбулентных вихрей повышается значение турбулентной диффузии. Наличие больших масс свежего воздуха в камере и небольшие скорости его движения создают условия, при которых градиент концентрации сохраняется более длительное время и обеспечивается диффузный перенос вещества.

Также на основе уравнения дисперсии (но с другими граничными условиями) рассмотрены модели газопереноса для камер, проветриваемых комбинированными турбулентными потоками (с переходом свободной струи в ограниченный поток), для камер с переходом ограниченного потока в свободную струю, камер, проветриваемых по нагнетательно-всасывающей схеме, тупиковых камер, проветриваемых последовательно [32].

Аэрогазодинамика очистных камер на примере сланцевых рудников исследовалась Лайгна К.Ю. с сотрудниками [35,36,37,38,39]. Изучены закономерности формирования круглых и плоских струй в камерах различного сечения и длины, исследована турбулентная структура потоков. На основе теории локальной турбулентности, по экспериментальным данным, найдены коэффициенты продольной и поперечной турбулентной диффузии круглых и плоских струй при различных коэффициентах стеснения. Эти коэффициенты носят эффективный характер (усреднены по сечению камеры) и используются в модели газопереноса в камерах [35,38].

Предложенная модель описывает перенос пассивной примеси, что не соответствует ситуациям работы в камерах дизельных двигателей. Повышенная температура выхлопных газов приводит к вертикальной стратификации воздушного потока и конвективной циркуляции [39]. Учет этих особенностей при математическом моделировании газопереноса предложено осуществлять использованием вместо предложенной модели уравнения продольной дисперсии с заменой в нем коэффициента дисперсии на коэффициент эффективной турбулентной диффузии стратифицированного потока, для которого предложено расчетное выражение [39].

Сотрудники Тульского Государственного университета под руководством Качурина Н.М. [21,22,23,24] доказали, что моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании выработок большого поперечного сечения, в том числе тоннелей, основывается в общем случае на системе уравнений Рейнольдса, описывающей течение вязкого, сжимаемого теплопроводного газа в трехмерной постановке.

Коллектив Горного института УрО РАН в своих исследованиях [10,11,12,14,66,67] так или иначе проводили исследования условий проветривания

тупиковых выработок, в том числе и большого сечения, с использованием математического моделирования в аналитической постановке. В работе [10] на основании аналитического моделирования определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения. В работе [11] установлено, что результаты, полученные на основании математического моделирования проветривания выработки вентилятором, размещенным на комбайне или в устье выработки, свидетельствуют о возможности эффективного использования представленного способа на небольших расстояниях, порядка 20 м для калийных рудников и 70 м – для гипсовых шахт. В работе [12] учтена теплота, выделяемая комбайном. Получена формула, учитывающая тепловыделения комбайна, для определения максимальной длины выработки, проветриваемой беструбным способом. В работе [14] представлена математическая модель сопряженного теплообмена воздуха и породного массива, позволяющая прогнозировать повышение температуры с течением времени в зависимости от длины выработки и суммарной интенсивности выделения теплоты в ней. В работах [66,67] с использованием математического моделирования показано, что процесс проветривания тупиковой выработки происходит медленнее, чем это описывает модель идеального смешения, ввиду присутствия в структуре воздушных потоков отдельных вихрей и застойных зон с пониженным массообменом с другими потоками.

Исследования, выполненные Пьянниковым В.П. [53] в математической модели тупиковой выработки, показали, что реверсирование вентиляционной струи позволяет нормализовать санитарно-гигиенические условия труда в основном участке тупиковой выработки при работе техники с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание.

В продолжение к исследованиям предыдущего автора Росляковым А.С. [54,55,56] на основании математического моделирования доказано, что увеличение объема призабойной зоны за счет использования вентилятора-турбулизатора и проветривания ее двумя последовательными свободными струями обеспечивает нормализацию санитарно-гигиенических условий труда в тупиковой выработке при работе погрузочно-доставочной машины с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание. Проветривание призабойной зоны двумя последовательными струями позволяет снизить количество необходимого для ее проветривания свежего воздуха в 2,8 раз.

### 1.3.2 Численное трехмерное моделирование

В связи со значительным прогрессом в области вычислительных технологий в последние годы все большее применение получают методы численного трехмерного моделирования, или CFD-методы (computational fluid dynamics), применительно к задачам рудничной вентиляции. Вычислительная гидрогазодинамика является одним из направлений механики сплошных сред, включающим совокупность математических, физических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоков жидкостей и газов. В сущности, CFD занимается численным решением дифференциальных уравнений, описывающих физику потоков жидкостей и газов, их взаимодействие с твердыми телами [76]. В CFD используются численные методы и алгоритмы для решения и анализа задач, связанных с вычислением характеристик потоков газов и жидкостей, тепломассопереносом, многофазными средами, химическими реакциями и т. д. При этом CFD-моделирование позволяет пользователю прогнозировать, что произойдет с потоком жидкостей и газов при том или ином наборе обстоятельств (начальных и граничных условий, геометрии расчетной области, физических параметров жидкости и газа).

В конце XX века с ростом мощностей компьютеров использование CFD-моделирования стало незаменимым инструментом прогнозирования и проектирования в горнодобывающей промышленности. CFD модели были впервые использованы Хирденом и Салливаном [96] для исследования характеристик воздушного потока в подземных выработках. На основе смоделированного поля потока исследовано поведение потока пыли и метана вокруг комбайна непрерывного действия. Однако верификация моделей в работе не проводилась. В работе [134] использован трехмерный код CFD для моделирования распределения скоростей воздуха вдоль забоя. Из-за ограничений компьютерных ресурсов смоделировано только 40 м забоя лавы. В работе [82] приведен общий процесс проведения CFD моделирования и сделан вывод, что потенциал использования CFD моделей велик для решения проблем, связанных с безопасностью и здоровьем. В работах [119,120] использованы CFD модели для оценки подачи воздуха различными системами вентиляции с целью разбавления метана и удаления пыли при добыче; сделан вывод, что CFD модели очень эффективны при проектировании вентиляции.

На рубеже XX века в работах [113,114,115] проведены исследования для изучения характера воздушного потока в выработках угольных шахт, по результатам которых достигнута согласованность моделирования с результатами испытаний физической модели. В работе [138] проведены исследования для оценки производительности

различных систем вентиляции в забое и продемонстрировано, что метод CFD может значительно облегчить проектирование систем вентиляции. В работах [139,140] выполнена серия эталонных экспериментов в масштабированной физической модели с целью проверки моделей CFD. В процессе валидации использовались как воздушный поток, так и распределение концентрации метана.

В начале XXI века в работах [75] построены модели выработок для длинных забоев, с целью понимания структуры газовых потоков в выработках, на основе которых были оптимизированы стратегии отвода газа для высокогазосодержащих шахт. В работе [122] выполнены как экспериментальные испытания, так и CFD исследования для изучения распределения потока в стволе угольной шахты. После проверки модели предсказанного поля потока выполнены параметрические исследования для определения распределения мертвой зоны и концентрации метана при трех различных системах вентиляции. В работе [77] изучен поток смеси воздуха и метана в зоне обратного пересечения длинных забоев и исследовано влияние расположения струйных вентиляторов на распределение метана. В работе [94] проведено моделирование вентиляционного потока в забое при проходке различными комбайнами. Результаты, полученные в ходе исследования, сравнивались с данными, полученными в результате экспериментов. В работах [125,126,127] проведены обширные исследования системы вентиляции длинных забоев, был спроектирован и установлен новый пылеотсос для очистного комбайна. В работе [72] использованы двумерные модели и исследовано влияние длины перемычки на поведение потока среды в областях поперечного среза. В работе [135] приведены результаты моделирования для изучения поведения потока метана в выработке угольной шахты, для целей верификации в выбранных поперечных сечениях и точках измерялись как воздушный поток, так и концентрация метана. В работе продемонстрировано, что применение CFD моделирования может быть эффективным инструментом для обнаружения зон, в которых метан имеет тенденцию к накоплению и, следовательно, требует необходимого улучшения вентиляции. Принимая во внимание метан, высвобождаемый из различных источников, то есть метан, выделяемый из угля, вырезанного комбайном, уголь на забойном конвейере, угольные ребра и уголь на ленте, в работе [151] смоделированы характеристики потока метана на забое лавы. Скорость выбросов метана, используемая в модели, была получена из полевых исследований, проведенных в работе [100]. В работе [117] смоделированы модели потоков воздуха и пыли в забое с использованием упрощенных моделей CFD, которые были проверены с использованием модели с уменьшенным масштабом. В работе [128] исследованы характеристики недавно разработанной системы водяного

тумана для подавления пыли на входе в длинный забой с помощью CFD моделей для длинных забоев. Система водяного тумана также использована для уменьшения образования пыли над подземным бункером в соответствии с моделированием проветривания и поведения потока пыли вокруг бункера [129]. В работе [136] изучена динамика газового потока в забое после взрывных работ и оценены безопасные условия для возвращения горняков в забой. В работах [145,146] разработана методология с комбинированным использованием индикаторного газа и CFD моделирования для удаленной оценки состояния подземных шахтных вентиляционных систем. В работе [130] продемонстрировано, что моделирование может быть эффективным подходом к улучшению системы вентиляции в угольных шахтах. По результатам исследований были изучены потоки воздуха и распределение метана при различных системах вентиляции. В работах [101,102,103] представлены результаты проведения серии исследований CFD-моделирования для оценки нескольких инновационных систем вентиляции по контролю за опасными газами с минимальными затратами энергии в забоях. В работе [97] оценена производительность параллельной установки главных вентиляторов для нужд расширения подземного рудника в Чили. В работе [88] проведено моделирование проветривания с использованием высокопроизводительного компьютера и заявлено, что до 75% вычислительного времени можно сократить с помощью комбинирования расчетных мощностей центрального и графического процессоров. В работе [93] использовано CFD моделирование для оценки влияния различных конструкций дренажа газа на контроль газа в выработках, на основе которых была предложена концептуальная модель для практического руководства проектированием горизонтального дренажа газа. В работе [124] для оптимизации отвода газа из выработки изучены схемы течения газа в выработке при различных параметрах отвода газа. В работе [104] предложена новая концепция стратегии повышения нефтеотдачи газа и с использованием моделирования оценено влияние нескольких параметров (таких как скорость всасывания и высота канала) на добычу газа. В работе [83] исследовано поведение воздушного потока и рассеивание газа во время строительства двойного туннеля. В работе [80] произведено моделирование влияния различных параметров вентиляции на распределение газа в выработках с учетом сбалансированного контроля газа в выработках и предотвращения пожаров. В работе [107] изучены характеристики вентиляционного потока в сверхбольших подземных туннелях и сделан вывод, что минимальная скорость воздуха должна быть больше 0,15 м/с, чтобы снизить концентрацию CO ниже предельно-допустимого значения в течение 20 минут. В работе [144] численно исследовано проветривание и поведение потока пыли в рабочей зоне туннелей при их

проходке туннелепроходческой машиной открытого типа и оптимизирована конфигурация проветривания для оптимального контроля пыли. В работах [78,79] проанализированы распределение метана в выработке и факторы, влияющие на его распределение. В работе [137] исследовано влияние герметизации пустот от вентиляционного штрека на распределение метана на обратном конце длинного забоя, сделан вывод, что уровень метана может быть значительно снижен, если положение герметизации и материал будут правильно спроектированы. В работе [147] приведен всесторонний обзор приложений CFD для решения проблем, связанных с вентиляцией шахт. Явление «помпажа» при параллельной установке вентиляторов главного проветривания с использованием численного моделирования было изучено в работе [92].

Также в последнее время растет тенденция к использованию CFD-моделирования для исследований аэродинамики пылевых частиц в подземных выработках. В работах [150,152,153] исследованы характеристики загрязнения вдыхаемой пылью в забое с использованием CFD-моделирования. В работах [141,142,149] CFD-моделирование использовано для оценки необходимой производительности генератора воздушной завесы по контролю за пылью. В работах [89,90] исследовано рассеивание пыли с проезжей части горной выработки с гибридной системой вентиляции. В работе [131] проведены численные исследования для оптимизации устройства вентиляционного канала в забое угольной шахты.

В работах Кольского научного центра РАН [1,10,29] проведены исследования процесса проветривания тупиковых выработок с использованием программного кода COMSOL. Авторы используют при моделировании проветривания стандартную  $k-\epsilon$  модель турбулентности. В работе [28] показано, что по сравнению с требованиями правил безопасности при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок после проведения взрывных работ имеется возможность увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб с соблюдением нормативного времени на проветривание за счет роста расхода воздуха. В работе [29] показано, что прогнозные значения времени проветривания тупикового забоя посредством механизма турбулентной диффузии при фиксированном расходе воздуха в основной выработке при вариации уровня начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки аппроксимируются логарифмической функцией. В работе [1] показано, что использование некоторых положений теории свободных турбулентных струй в приложении к задаче проветривания тупиковых выработок беструбным способом не находит подтверждения в результатах численного моделирования.



Коллективом Горного института УрО РАН численное трехмерное моделирование используется для решения задач проветривания тупиковых выработок большого сечения [10,40]. В работе [10] результаты аналитического моделирования подтверждены численным моделированием и определены эффективные условия использования источников тяги для проветривания выработок большого сечения. В работе [40] на основании численного моделирования определены места наилучшего расположения эжекторных установок для проветривания тупиковых камер большого сечения беструбным способом.

Кобылкиным А.С. неоднократно использовалось численное моделирование для решения задач эффективности проветривания подземных горных выработок по фактору разжижения выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания [26,27].

Зарубежные исследователи также занимались рассмотрением вопроса численного моделирования процесса проветривания тупиковых горных выработок. В работе [84] проведены исследования максимальной длины проветривания тупиковой выработки за счет турбулентной диффузии. На основе численного моделирования с использованием стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности было показано, что для выработки длиной 20 м, шириной 6.6 м и высотой 3 м максимальная длина проветривания тупиковой горной выработки составляет 12 м. Такая величина достигалась при скорости воздуха в сквозной выработке 1.35 м/с. Результаты исследования согласуются с данными эксперимента, проведенного ранее другими исследователями [111]. В работе [121] произведены исследования проветривания тупиковой горной выработки при различных расстояниях между забоем и концом вентиляционного трубопровода (2 м, 5 м и 8 м), а также при различных скоростях воздуха на выходе из трубопровода (от 5 до 15 м/с). При моделировании использована стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Верификация численной модели достигалась сравнением с экспериментальными данными, представленными в работе [122]. В работах [85, 86, 87] было проведено многопараметрическое CFD-моделирование проветривания тупиковой выработки с использованием продольной перегородки без вентиляторов местного проветривания и вентиляционных трубопроводов. В работах использовалась  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. В работе [95] исследовалась эффективность проветривания тупиковой горной выработки при одновременном использовании продольной перегородки и всасывающего вентилятора с вентиляционным трубопроводом, отводящего воздух на исходящую струю через перемычку. Расчет производился в стационарной постановке в приближении несжимаемого газа, а для моделирования турбулентности использовалась модель standard  $k$ - $\varepsilon$  со стандартной пристеночной функцией.

### 1.3.3 Численные методы моделирования турбулентных течений

Классификация существующих подходов к численному моделированию турбулентных течений основана на степени детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. С учётом этого признака можно выделить четыре основных подхода: прямое численное моделирование системы уравнений Навье-Стокса (direct numerical simulation, или DNS), метод крупных вихрей (large eddy simulation, или LES), метод, основанный на осреднении по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier-Stokes, или RANS) и метод отсоединенных вихрей (detached eddy simulation, или DES) [61].

#### Метод DNS

Для метода DNS требуется численное разрешение всех пространственных и временных масштабов, от самых крупных до самых малых (колмогоровских). Это приводит к тому, что прямое численное моделирование течений, имеющих практическое значение в инженерной деятельности, еще достаточно долго будет недоступно, во-первых, в связи с ограниченными возможностями современных вычислительных устройств, во-вторых, из-за избыточности информации, которую дает DNS, для инженерной практики.

#### Метод LES

Суть метода LES заключается в том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а влияние мелких вихрей моделируется. Уравнения сохранения для моделирования крупных вихрей получаются с помощью фильтрации мгновенных уравнений сохранения [3,61,91,123]. Это вычислительно дорогой метод, который не обязательно приводит к улучшению результатов прогнозирования для полностью развитого турбулентного потока по сравнению с RANS моделями [132].

#### Метод RANS

Метод RANS основан на решении уравнений Рейнольдса, полученных в результате осреднения уравнений Навье-Стокса. Уравнения Рейнольдса представляют собой уравнения переноса для средних значений параметров потока, подверженных случайным пульсациям. При выводе уравнений Рейнольдса используется разложение мгновенного значения скорости на сумму среднего значения и пульсационной составляющей.

## Метод DES

Метод DES является комбинацией LES и RANS моделей. Идея метода DES состоит в использовании RANS-моделей только в тех областях потока, где локальный размер используемой вычислительной сетки недостаточно мал для разрешения турбулентных структур с линейными масштабами порядка характерного локального масштаба турбулентности, и в использовании метода LES в остальной области потока. В существующей литературе по рудничной вентиляции не удалось найти работ, в которых применялся бы метод DES [3].

## Выбор метода

Для задач переноса газовой смеси в пределах тупиковых горных выработок наиболее применим метод RANS [15].

### 1.3.4 Модели турбулентности, применяемые при численном моделировании процесса проветривания методом RANS

Ниже представлены наиболее часто применяющиеся в задачах рудничной вентиляции модели турбулентности, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

#### Модель Спаларта-Аллмареса (SA)

Модель, разработанная Спалартом и Аллмаресом [133], содержит одно дифференциальное уравнение относительно «высокорейнольдсовой» турбулентной вязкости, связанной с турбулентной вязкостью алгебраическим соотношением. В качестве линейного масштаба турбулентности используется расстояние до стенки. Модель была разработана для задач внешней аэродинамики. В этой модели для замыкания гипотезы Буссинеска необходима турбулентная вязкость. Модель SA является экономичной с точки зрения вычислительных мощностей и позволяет достаточно точно рассчитывать простые течения без больших зон отрыва [61].

#### Стандартная модель k-ε

Стандартная модель k-ε, или standard k-ε, представляет собой двухпараметрическую модель, в которой турбулентная динамическая вязкость вычисляется путем решения двух дополнительных уравнений переноса: кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации турбулентности  $\varepsilon$  [112]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1.3)$$

где  $C_\mu$  – константа модели.

К недостаткам стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели можно отнести низкую точность при моделировании течений с отрывом от поверхностей, при моделировании потоков с вращением, сильным завихрением и потоков с сильной кривизной линии тока [61]. Отчасти это связано с тем, что гипотеза Буссинеска о турбулентной вязкости в этих обстоятельствах не верна, а также с тем, что уравнение для  $\varepsilon$  имеет много эмпирических констант, которые не являются универсальными для всех типов течений.

### **Модель RNG $k$ - $\varepsilon$**

Модель RNG  $k$ - $\varepsilon$  является улучшением стандарт  $k$ - $\varepsilon$  и основывается на статистических методах, используемых в области теории ренормализованных групп (Renormalization Group) [108,148]. Структура уравнений переноса для кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  остается прежней, но для вычисления турбулентной вязкости вводится аналитическая зависимость, позволяющая повысить точность расчета характеристик турбулентных течений при малых числах Рейнольдса. Опыт применения модели RNG  $k$ - $\varepsilon$  показал улучшенное (по сравнению с стандарт  $k$ - $\varepsilon$ ) согласование расчетных и экспериментальных данных для некоторых типов течений, в частности при относительно малых числах Рейнольдса, большой кривизне линий тока и в областях больших деформаций поля скорости [3,61].

### **Реализуемая модель $k$ - $\varepsilon$**

«Реализуемая» означает, что модель удовлетворяет определенным ограничениям на напряжения Рейнольдса, присущим реальным турбулентным течениям, чего нет в двух других  $k$ - $\varepsilon$  моделях. Реализуемая модель  $k$ - $\varepsilon$  имеет то же уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности, что и стандартная модель, но для расчета турбулентной вязкости использует переменную  $C_\mu$ , вместо константы в standard  $k$ - $\varepsilon$ . Используется новое уравнение переноса для скорости диссипации турбулентной энергии [74]. Отличия этого уравнения от стандартного заключаются в том, что член генерации диссипации пропорционален интенсивности скоростей сдвига осредненного течения. Для этой модели подобраны ее константы для течений в турбулентных струях. Расчеты показывают, что ее применение предпочтительнее при моделировании отрывных и сложных вторичных течений, а также течений в пограничных слоях с обратным градиентом давления [74,108].

### **Модель $k$ - $\omega$**

Модель турбулентности  $k$ - $\omega$  не имеет указанных ранее недостатков standard  $k$ - $\varepsilon$  модели [143]. В модели  $k$ - $\omega$  турбулентная динамическая вязкость вычисляется путем

решения двух дополнительных уравнений переноса: кинетической энергии турбулентности  $k$  и частоты турбулентных пульсаций  $\omega$ :

$$\mu_t = \rho a^* \frac{k}{\omega}, \quad (1.4)$$

где  $a^*$  – демпфирующая функция, корректирующая значение турбулентной вязкости при низких числах Рейнольдса. Для больших чисел Рейнольдса  $a^* = 1$ .

Данная модель дает лучшее решение в пристеночном слое, а также она хорошо зарекомендовала себя при моделировании течений по сильно искривленным каналам, отрывных и струйных течений. Однако, она отличается высокой степенью нелинейности, и поэтому хуже сходится, чем стандартная модель  $k$ - $\epsilon$ . Также, недостатком  $k$ - $\omega$  модели является довольно сильная зависимость результатов расчета от значений  $\omega$ , задаваемых на входе в расчетную область.

### **Модель SST $k$ - $\omega$**

Модель переноса сдвиговых напряжений SST  $k$ - $\omega$  (Shear Stress Transport) сочетает в себе достоинства моделей  $k$ - $\omega$  и  $k$ - $\epsilon$ . В модели SST  $k$ - $\omega$  для расчета течения в свободном потоке используются уравнения  $k$ - $\epsilon$  модели, а в области вблизи стенок – уравнения  $k$ - $\omega$  модели [3]. Модель SST  $k$ - $\omega$  хорошо зарекомендовала себя в расчетах отрывных течений с небольшой зоной отрыва [99,109,110].

### **Модели RSM**

Предполагаемая гипотезой Буссинеска пропорциональность тензоров рейнольдсовых напряжений и скоростей деформаций осредненного течения имеет место не во всех течениях. Для учета эффектов, связанных с анизотропией рейнольдсовых напряжений, разработаны модели переноса напряжений Рейнольдса, или RSM-модели. В этих моделях для решения проблемы замыкания решаются 7 дополнительных уравнений переноса для рейнольдсовых напряжений, в связи с чем требуются существенные вычислительные мощности. С помощью RSM-моделей можно более точно учесть эффекты закрученности потока, вращения, резкого изменения напряжений между слоями, чем с использованием одно- и двухпараметрических моделей турбулентности. Однако RSM-модели имеют некоторые упрощения, которые были приняты для составления уравнений переноса рейнольдсовых напряжений, в связи с чем требуется использование специальных средств для обеспечения устойчивости и сходимости. Использование этих моделей турбулентности рекомендуется в случаях, когда анизотропия турбулентного потока оказывает доминирующее влияние на характер турбулентного течения [61].

## **Выбор модели турбулентности**

В работе [99] рассмотрена задача проветривания тупиковой очистной камеры, использованы различные модели турбулентности и доказано, что стандартная  $k-\epsilon$  модель турбулентности позволяет рассчитать многие турбулентные течения с приемлемой для задач рудничной вентиляции точностью и дает достаточно хорошую сходимость результатов. Таким образом, для задач переноса газовой смеси в пределах тупиковых горных выработок с достаточной точностью применима стандартная  $k-\epsilon$  модель турбулентности [15,52,99].

### **1.4 Цели и задачи исследования**

Авторы указанных в разделе работ так или иначе занимались рассмотрением вопроса моделирования процесса проветривания тупиковых горных выработок, однако подробных исследований процесса проветривания тупиковых камерообразных горных выработок длиной более 10 м нет.

Целью настоящей работы является разработка безопасных параметров проветривания при отработке запасов тупиковыми очистными камерами буровзрывным способом в условиях изменяющегося объема камерного пространства и развала горной массы.

Для достижения поставленной цели требуется решить ряд задач:

1. Разработать программу проведения натурных измерений и исследовать в условиях действующих рудников процессы газовой выделений самоходного горно-шахтного оборудования с двигателями внутреннего сгорания.
2. Разработать и параметризовать математическую модель проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания.
3. Провести многопараметрическое моделирование процесса проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы с целью выявления факторов влияния на процесс проветривания тупиковых камер.
4. Осуществить корректировку аналитической модели выноса газов в тупиковой выработке с учетом камерного пространства.
5. Разработать методику расчета и организации проветривания протяженных тупиковых очистных камер.



## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ В ИСХОДЯЩЕЙ СТРУЕ ОЧИСТНЫХ ТУПИКОВЫХ КАМЕРООБРАЗНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Источники газовыделений в очистных тупиковых камерообразных выработках можно разделить на два вида: естественные и производственные. К естественным можно отнести газовыделения из не отбитой породы, газовыделения из разрушенной горной массы, а также газовыделения в процессе окисления руды. К производственным: газовыделения от техники с двигателем внутреннего сгорания, работающей в пространстве камеры, газовыделения после производства взрывных работ. Наибольшее из этих двух источников количество газа выделяется от техники с ДВС.

Для выявления закономерностей распространения газовых примесей выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания в пространстве очистной камеры и прилегающей к ней разрезной выработке были спланированы и осуществлены экспериментальные исследования. Ниже представлены описание методики, замеренные значения концентраций газа в исходящей струе воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок и их анализ.

### **2.1 Методика проведения экспериментальных измерений качественного состава исходящей струи воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок**

#### **2.1.1 Этапы измерений**

С целью оптимизации времени выполнения измерений и наименьшего отрыва от производства персонала комплексные натурные измерения производятся в следующей последовательности:

1. На первом этапе производятся измерения концентраций ядовитых газов в рабочей зоне по истечению регламентного времени проветривания (30 минут) после производства взрывных работ в камерном пространстве.
2. На втором этапе производятся измерения аэродинамических параметров проветривания тупиковых очистных камер. Эти данные в дальнейшем будут использованы для валидации численной трехмерной модели проветривания с точки зрения соответствия полей скоростей движения воздуха в исследуемых сечениях, полученных в результате моделирования, фактическому воздухораспределению.
3. На третьем этапе производятся измерения концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания из выхлопного тракта. Измерения производятся методом отбора проб и экспресс-методом. Полученные



данные используются для задания источника газовой выделенности при дальнейшем численном трехмерном моделировании.

4. На четвертом этапе производятся измерения концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины, расположенное в устье очистного пространства. Полученные данные позволяют оценить эффективность проветривания тупиковых очистных камер с точки зрения разжижения ядовитых газов до предельно-допустимых концентраций и ниже. Также полученные концентрации используются для валидации численной трехмерной модели проветривания с точки зрения соответствия концентраций вредных компонентов, полученных в результате моделирования, фактическим концентрациям. Производится корректировка модели при необходимости.
5. На пятом этапе производятся динамические измерения концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины, расположенное в устье очистного пространства.

### **2.1.2 Технологические режимы проведения натуральных измерений**

На первом этапе натуральных исследований измерения производятся по истечении регламентного времени проветривания после производства взрывных работ.

На втором этапе натуральных исследований все замеры производятся во время отсутствия любой техники в пределах нарезной выработки и очистного пространства камеры.

На третьем этапе замеры производятся при нахождении ПДМ в очистном пространстве камеры. Замеры производятся на холостом ходу и при максимальной нагрузке на двигатель.

На четвертом этапе натуральных исследований все замеры производятся в технологическом режиме «отгрузка отбитой горной массы дистанционно управляемой ПДМ». Производится не менее четырех полных циклов по отгрузке горной массы.

На пятом этапе натуральных исследований все замеры производятся в технологическом режиме «отгрузка отбитой горной массы дистанционно управляемой ПДМ». Время проведения измерений определяется фактическим временем работы ПДМ по отгрузке руды.

### 2.1.3 Измеряемые параметры

В рамках испытаний измеряются величины следующих параметров для каждого режима проветривания:

- Геометрические параметры нарезной выработки, положение вентиляционного трубопровода, его диаметр, а также величина развала руды. Указанные геометрические величины измеряются лазерным дальномером. Согласно «Методике...» [44] для точного определения необходимо провести по 3 измерения.
- Поле скоростей воздуха в сечении нарезной выработки. Данный параметр позволяет валидировать в дальнейшем численную трехмерную модель с целью максимального соответствия моделируемых процессов проветривания натуре.
- Температура и влажность воздуха: выходящего из вентиляционного става и находящегося в объеме разрезной выработки.
- Расход воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода.
- Депрессия ВМП с учетом вентиляционного трубопровода.
- Содержание нормируемых газовых примесей в воздухе рабочей зоны, который, по факту, является исходящим воздухом из очистной тупиковой камеры. Для расчета количества воздуха влияющим фактором является содержание компонентов выхлопных газов, регламентируемых Правилами безопасности [68]. Правилами безопасности регламентируется содержание кислорода ( $O_2$ ), оксида углерода (CO) и окислов азота ( $NO+NO_2$ ). Таким образом, измеряемыми параметрами являются содержание CO, NO и  $NO_2$ .
- Температура выхлопных газов зачастую регламентируется внутренними нормативными документами промышленного предприятия и влияет на оценку технического состояния машины.
- Давление выхлопных газов не регламентируется.

### 2.1.4 Измерение качественного состава выхлопных газов машин

Натурные измерения производятся в сквозной горной выработке длиной более 40 м. Длина сквозной выработки не менее 40 м обусловлена: длиной погрузочно-доставочной машины (10 м); минимальным расстоянием необходимым для проведения измерений (полного смешения струй газа и свежего воздуха), равным 30 м. Полное смешивание потоков свежего и загазованного воздуха происходит за счет развитого турбулентного режима движения воздуха и в сечении выработки, удаленном от забоя на 5 значений ширины выработки, скорость и состав воздуха будут

равномерными по сечению. Минимальное расстояние для проведения измерений обусловлено «Методикой измерений расхода воздуха...» [44].

Согласно «Методике...» [44]: при наличии складированных материалов расстояние до места замера расхода воздуха должно быть не менее 5-кратной ширины выработки, т.е. в случае измерения концентраций газов экспресс-методом машина будет являться препятствием и необходимо выдержать 5-кратный запас по ширине выработки, т.е. при максимальной ширине выработок 6 м необходимое расстояние до точки замера не менее 30 м.

А также согласно «Методике...» [44]: при наличии вагонов в сечении выработки замер производят на расстоянии, равном не менее 3-х кратной длины вагона, что можно интерпретировать как 3-х кратный запас по длине погрузочно-доставочной машины, т.е. при длине ПДМ 10 м необходимое расстояние до точки замера не менее 30 м.

Горная выработка, в которой осуществляются измерения, проветривается свежей струей воздуха без возможной примеси выхлопных газов ДВС.

Измерения осуществляются в двух режимах работы: холостой ход и полная нагрузка на двигатель. Измерения осуществляются при рабочей температуре двигателя.

### **Измерение качественного состава выхлопных газов машин методом отбора проб**

Измерения производятся путем отбора проб выхлопных газов в полипропиленовые одноразовые шприцы объемом 160 мл. Производится отбор трех шприцов с одной машины.

Отобранные пробы поднимаются на поверхность, где естественным путем охлаждаются до температуры атмосферы и принимают давление окружающей среды.

На поверхности каждая из проб разбавляется свежим воздухом. Разбавление пробы воздухом необходимо так как предел измеряемой концентрации вредного вещества для применяемых индикаторных трубок значительно меньше фактического значения концентрации данного компонента в выхлопных газах ДВС. Разбавление пробы воздухом производится в соотношении 1:9 (100 мл – проба, 900 мл – свежий воздух). Разбавление проб осуществляется в герметичных металлических шприцах объемом 1,1 л.

Разбавленная проба из металлического шприца прогоняется через индикаторную трубку, рассчитанную на объем 1 л. После снятия полученного значения со шкалы индикаторной трубки производится обратный пересчет на фактическую концентрацию исходя из соотношения разбавления для всех трех замеренных концентраций.

Полученные результаты концентраций газа должны быть обработаны в соответствии с теорией статистической обработки данных [7,71], представленной ниже.

Итоговая концентрация компонентов выхлопных газов определяется средним значением трех проб. Среднее значение измеряемой величины  $x$  (концентрация газа) определяется по формуле:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество проведенных измерений,  $k$  – порядковый номер измерения,  $x_k$  – результат  $k$ -го измерения.

Среднее квадратичное отклонение определяется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \langle x \rangle)^2}{n \cdot (n - 1)}}. \quad (2.2)$$

Величина случайной ошибки при проведении серии измерений определяется по формуле:

$$\Delta x_{\text{случ}} = t_p(n, p) \cdot \sigma, \quad (2.3)$$

где  $t_p(n, p)$  – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Коэффициенты Стьюдента  $t_p(n, p)$  для доверительной вероятности  $p$  ( $n$  – количество измерений)

| $n$ | $p$         |             |             |              |
|-----|-------------|-------------|-------------|--------------|
|     | <b>0,68</b> | <b>0,95</b> | <b>0,99</b> | <b>0,999</b> |
| 2   | 2,0         | 12,7        | 63,7        | 636,6        |
| 3   | 1,4         | 4,3         | 9,9         | 31,6         |
| 4   | 1,3         | 3,2         | 5,8         | 12,9         |
| 5   | 1,2         | 2,8         | 4,6         | 8,6          |
| 6   | 1,2         | 2,6         | 4,0         | 6,9          |
| 7   | 1,1         | 2,4         | 3,7         | 6,0          |
| 8   | 1,1         | 2,4         | 3,5         | 5,4          |
| 9   | 1,1         | 2,3         | 3,4         | 5,0          |
| 10  | 1,1         | 2,3         | 3,3         | 4,8          |
| 15  | 1,1         | 2,1         | 3,0         | 4,1          |
| 20  | 1,1         | 2,1         | 2,9         | 3,9          |
| 30  | 1,1         | 2,0         | 2,8         | 3,7          |
| 50  | 1,1         | 2,0         | 2,7         | 3,5          |
| 100 | 1,0         | 2,0         | 2,6         | 3,4          |

Абсолютная погрешность прибора может быть вычислена через его допускаемую относительную погрешность  $\delta$  по формуле:

$$\Delta x_{\text{приб}} = \langle x \rangle \cdot \delta. \quad (2.4)$$

Суммарная погрешность вследствие случайных ошибок и абсолютной приборной погрешности  $\Delta x_{\text{приб}}$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{случ}}^2 + \Delta x_{\text{приб}}^2}. \quad (2.5)$$

Результат измерений величины  $x$  записывается в виде:

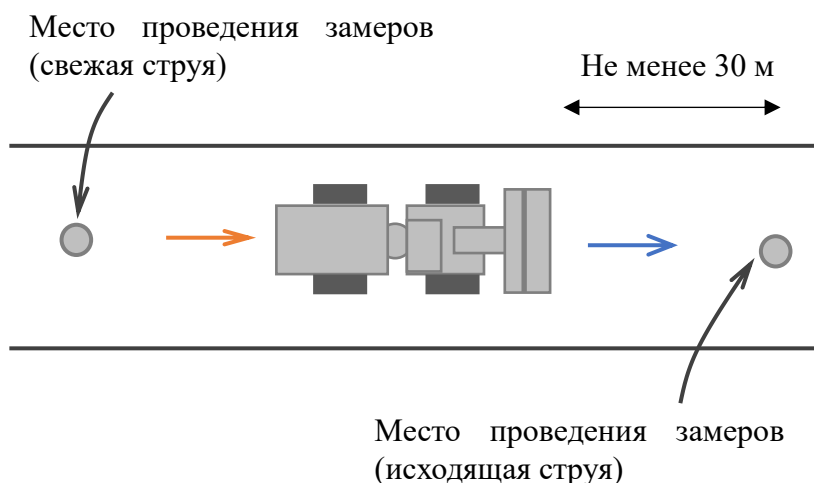
$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x. \quad (2.6)$$

Для учета максимальной возможной ошибки измерений величины  $x$  записывается в виде:

$$x = \langle x \rangle + \Delta x. \quad (2.7)$$

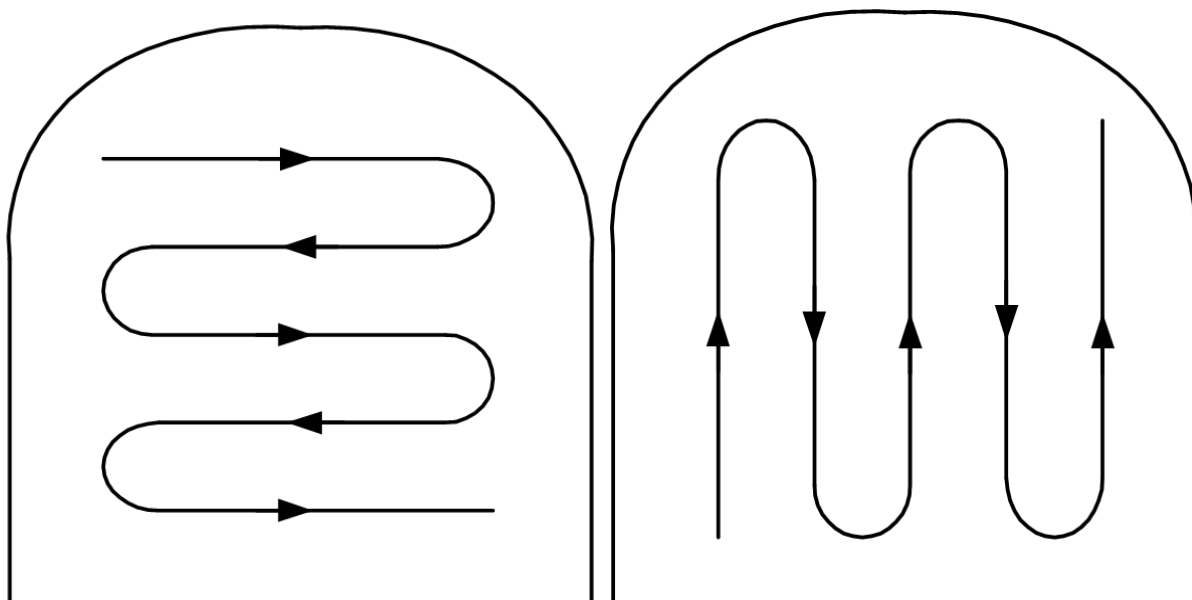
### **Измерение качественного состава выхлопных газов машин экспресс-методом**

Замеры экспресс-методом концентраций кислорода и ядовитых компонентов выхлопных газов (окись углерода, углекислый газ, монооксид азота, диоксид азота) производятся с помощью портативного газоанализатора в воздухе до и после техники с ДВС по тракту движения воздушной струи (рисунок 2.1) после смешения с выхлопными газами (на расстоянии не менее 30 м от машины).



**Рисунок 2.1 – Схема выполнения замеров в сквозной выработке**

Для определения расхода воздуха, проходящего по выработке, необходимо произвести серию замеров ее площади сечения и скорости воздуха в выработке. Выполнение измерений скорости воздуха осуществляется путем равномерного обвода всего сечения выработки в горизонтальном и вертикальном направлениях (рисунок 2.2).



**Рисунок 2.2 – Схема выполнения измерений скорости воздуха в горизонтальном и вертикальном направлениях**

В выработках высотой более 2 м средство измерения крепится к удлинителю, в качестве которого применяются как специальные устройства, так и различного рода предметы, имеющие длину, позволяющую сделать замер у кровли выработки.

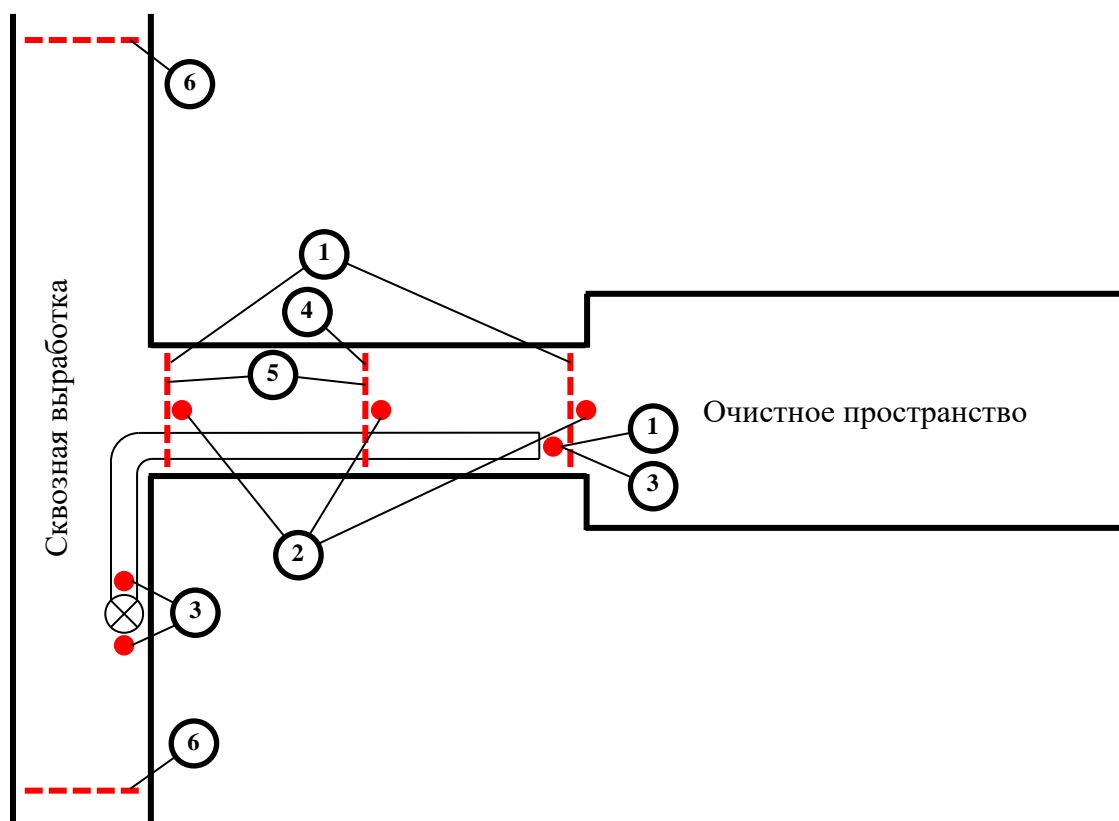
Полученные результаты скорости движения воздуха должны быть обработаны в соответствии с теорией статистической обработки данных [7,71], представленной ранее.

Согласно «Методике...» [44] время выполнения замера в выработках сечением до  $15 \text{ м}^2$  должно быть не менее 100 секунд, в выработках сечением  $15\text{-}25 \text{ м}^2$  – 200 секунд.

Площадь поперечного сечения горных выработок измеряется лазерным дальномером. Согласно «Методике...» [44] для точного определения площади поперечного сечения необходимо провести по 3 измерения высоты и ширины горной выработки, а затем по этим размерам построить ее сечение в одном из графических редакторов («AutoCAD», «Компас» и др.). Замерять площадь поперечного сечения выработки нужно в том месте, где производился замер скорости воздуха.

### **2.1.5 Схема проведения измерений**

На рисунке 2.3 представлена общая схема измерений параметров режима проветривания очистной камеры, нарезной выработки и прилегающей к ней сквозной выработки в технологических режимах «проветривание после производства взрывных работ» и «отгрузка горной массы».



**Рисунок 2.3 – Схема измерений параметров режима проветривания**

Цифрой 1 обозначены сечения для замера поля скоростей воздуха, а также скорости воздуха на конце вентиляционного трубопровода.

Цифрой 2 обозначены точки измерения температуры и влажности воздуха.

Цифрой 3 обозначены точки измерения полного давления воздуха для расчета режима работы ВМП.

Цифрой 4 обозначено сечение для отбора проб воздуха для лабораторного анализа.

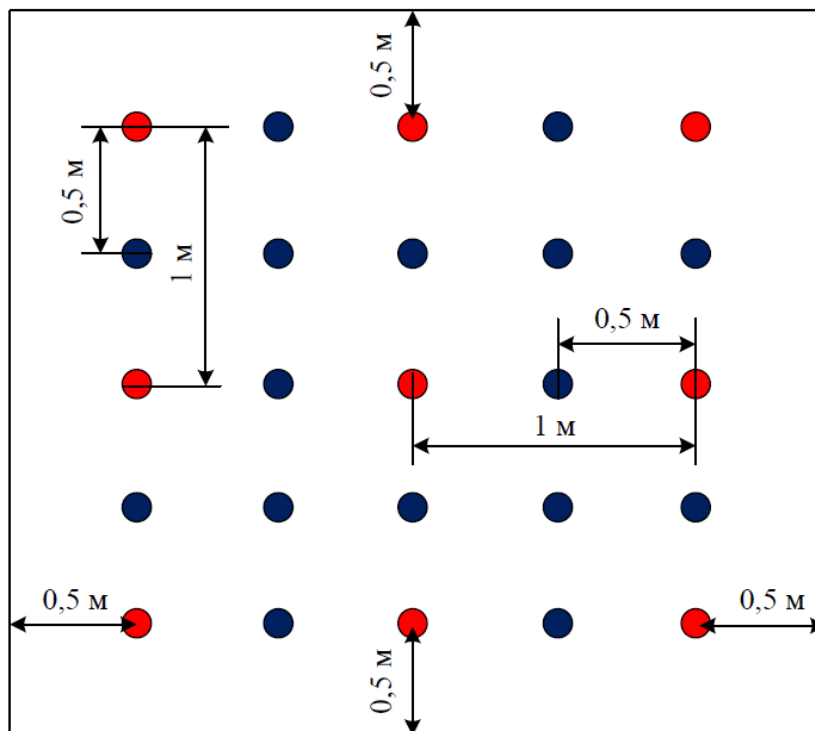
Цифрой 5 обозначены сечения для проведения экспресс-замеров компонентного состава воздуха индикаторными трубками.

Цифрой 6 обозначены сечения для измерения расходов воздуха и проведения экспресс-замеров компонентного состава воздуха в сквозной выработке до и после сопряжения с тупиковой камерой.

### **2.1.6 Проведение измерений параметров режима проветривания и оборудование для измерений**

Поле скоростей воздуха измеряется анемометром. При этом измерения скорости движения воздуха происходит по точкам в рассматриваемом поперечном сечении выработки. В каждой точке делается три замера продолжительностью 60 секунд. Исключением являются точки с нулевым значением скорости воздуха.

На рисунке 2.4 приведен пример схемы расположения необходимых точек измерения скоростей движения воздуха, направленных на получение поля скоростей воздуха в сечении разрезной выработки.



**Рисунок 2.4 – Схема расположения точек замеров скоростей движения воздуха**

Начальный интервал расстояний между основными точками замеров (обозначены красным цветом) составляет 1 м. При получении в точках ненулевых расходов воздуха интервал замеров между такими точками снижается до 0,5 м (дополнительные точки замеров обозначены синим цветом).

Температура и влажность воздуха измеряются цифровым термовлагомером. На выходе из вентиляционного става производится измерение путем помещения датчика прибора в струю выходящего воздуха.

Для определения температуры и влажности воздуха в разрезной выработке производится серия замеров путем равномерного обвода всего сечения выработки в горизонтальном и вертикальном направлениях по аналогии с методом измерения скорости воздуха, представленном на рисунке 2.2.

Средний расход воздуха на конце вентиляционного трубопровода измеряется в сечении его устья анемометром. Производится три замера продолжительностью не менее 60 секунд путем обвода по сечению.

Депрессия ВМП рассчитывается на основании замеров полного давления на всасе, выхлопе ВМП и конце вентиляционного става с использованием прецизионного барометра или манометра.



Компонентный состав воздуха рабочей зоны определяется экспресс-методами с использованием цифровых газоанализаторов. При этом фиксируется факт превышения предельно-допустимого содержания того или иного компонента в проветриваемом объеме рабочей зоны. Для этого на момент испытаний приборы во включенном состоянии раздаются замерщикам, которые для проведения замеров перемещаются внутри проветриваемого объема рабочей зоны. Измерение содержания ядовитых компонентов рудничного воздуха производится также экспресс-методом с помощью индикаторных трубок. Кроме того, производится контрольный отбор проб воздуха для анализа в лабораторных условиях.

После производства измерений компонентного состава воздуха рабочей зоны в рамках пятого этапа в характерных сечениях нарезной выработки проводятся динамические измерения компонентного состава рудничной атмосферы. Время проведения измерений определяется фактическим временем работы ПДМ по отгрузке руды.

## **2.2 Результаты экспериментальных измерений качественного состава исходящей струи воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель»**

В ходе натурных исследований измерены поля скоростей движения воздуха в сечении нарезной выработки и изменение концентраций газа со временем. Измерения произведены с целью выявления особенностей распространения вредных примесей, а также дальнейшей параметризации численной модели проветривания тупиковой камеры.

Также в ходе натурных измерений производилось фиксирование времени въезда в камеру и выезда из камеры ПДМ с целью оценки среднего времени пребывания и отсутствия ПДМ, а также для дальнейшей параметризации численной модели.

### **2.2.1 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 10-9-1 на руднике «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель»**

Натурные исследования в очистной камере 10-9-1 на руднике «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель» произведены в 2016 году. Фиксирование концентраций газа на исходящей струе при этом производилось точечным замером в момент выезда техники из очистного пространства.

На рисунках 2.5, 2.6 представлены план и разрез по оси очистной камеры, соответствующие проекту по отработке исследуемой камеры.

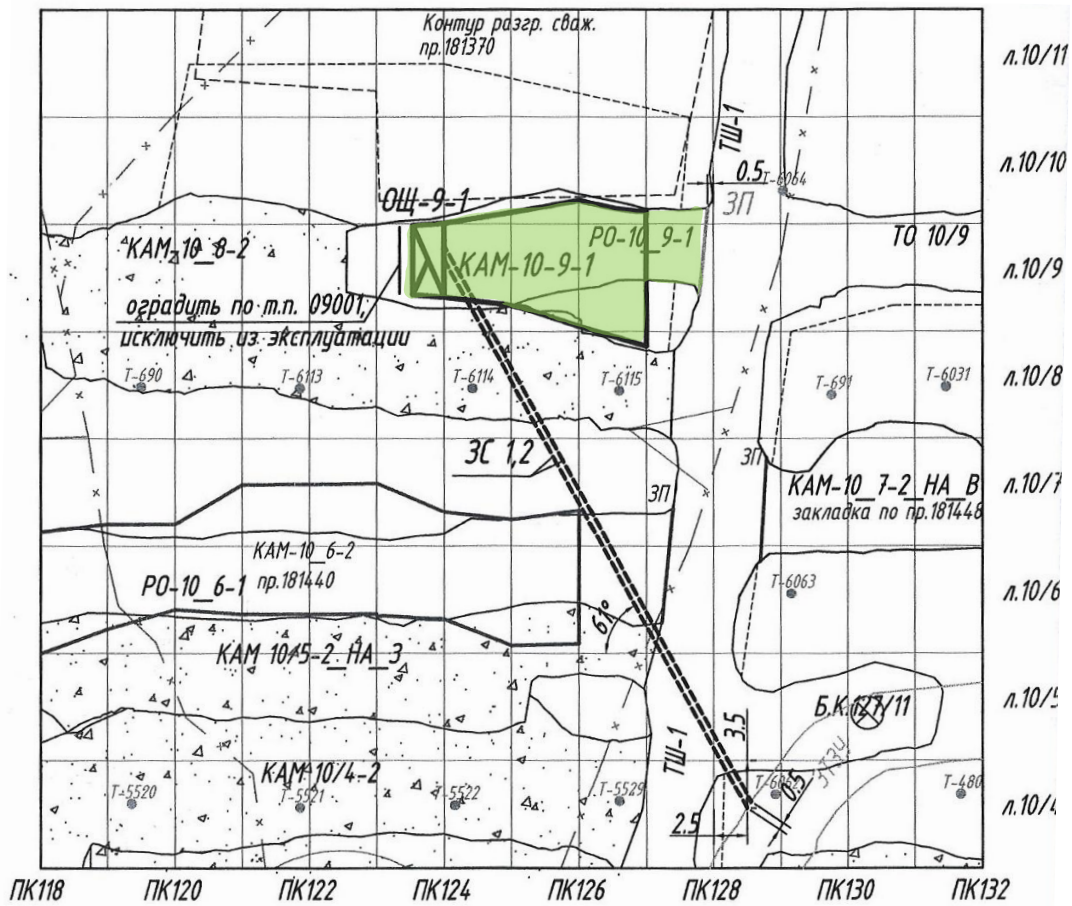


Рисунок 2.5 – Очистная тупиковая камера 10-9-1 в плане

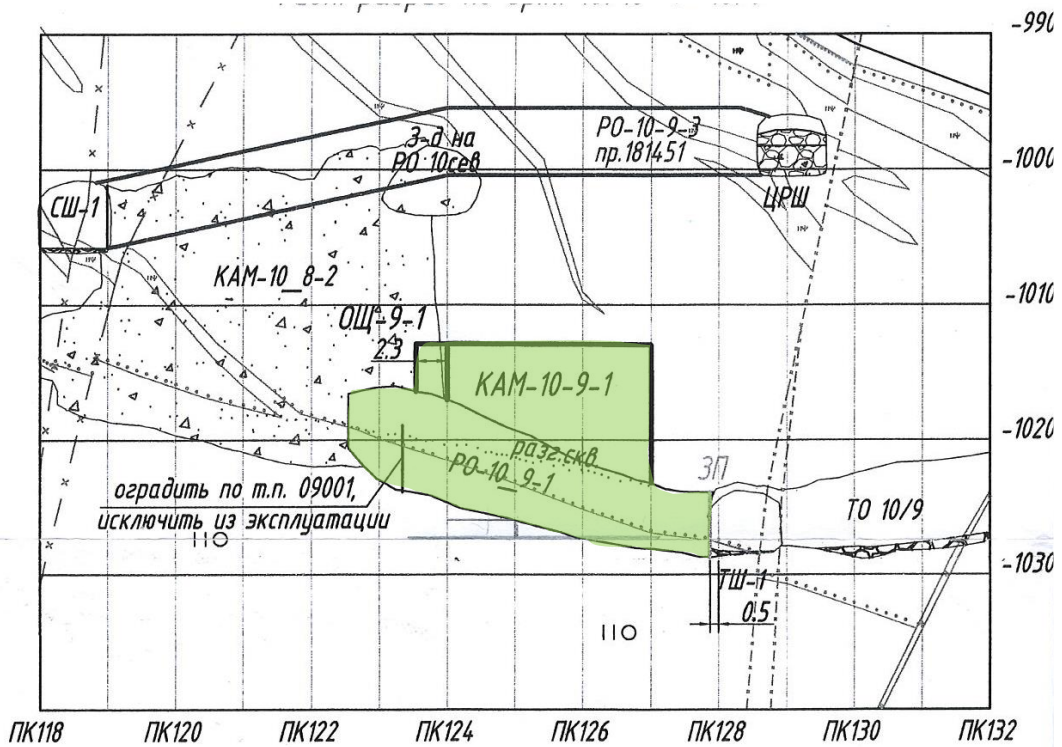


Рисунок 2.6 – Очистная тупиковая камера 10-9-1 в разрезе

Согласно плану обработки очистная тупиковая камера 10-9-1 имеет следующие геометрические параметры:

- Длина – 15 м;
- Ширина – 6÷12 м;
- Высота – 12÷15 м.

Очистная тупиковая камера 10-9-1 имеет уклон вверх по почве камеры, что затрудняет погрузку горной массы ПДМ.

Во время проведения испытаний очистная камера проветривается с использованием двух ВМ-6, работающих на два вентиляционных трубопровода диаметром 0,8 м (один длиной – 10 м, другой – 35 м).

Один трубопровод отстает от линии очистной камеры на 4 м, скорость воздуха на выходе из трубопровода составляет 8,5 м/с. Другой трубопровод отстает на 7 м, скорость воздуха – 4,6 м/с. Суммарная подача свежего воздуха составляет 13,1 м<sup>3</sup>/с (расчетное количество воздуха для данной камеры составляет 12,1 м<sup>3</sup>/с).

Натурные испытания газовыделений при технологическом режиме «отгрузка руды ПДМ» произведены в условиях конечной стадии обработки камеры (наибольший объем очистной камеры). Во время проведения испытаний ПДМ полностью находится в пространстве очистной камеры. Отгрузка руды производится двумя ПДМ ST-14 поочередно отгружающими руду, таким образом время отсутствия ПДМ в камере снижается.

В таблице 2.2 приведен фактический графики работы ПДМ в очистной камере 10-9-1 подземного рудника «Гаймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 2.2 – График работы ПДМ в очистной камере 10-9-1 подземного рудника «Гаймырский»

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 0-90                    | 90       | ПДМ отсутствует                |
| 90-210                  | 120      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 210-270                 | 60       | ПДМ отсутствует                |
| 270-480                 | 210      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 480-570                 | 90       | ПДМ отсутствует                |
| 570-660                 | 90       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 660-810                 | 150      | ПДМ отсутствует                |
| 810-960                 | 150      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 960-1050                | 90       | ПДМ отсутствует                |
| 1050-1200               | 150      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |

| <b>Временной промежуток, с</b> | <b>Время, с</b> | <b>Цикл работы</b>             |
|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1200-1320                      | 120             | ПДМ отсутствует                |
| 1320-1440                      | 120             | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1440-1560                      | 120             | ПДМ отсутствует                |
| 1560-1620                      | 60              | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1620-1830                      | 210             | ПДМ отсутствует                |
| 1830-2010                      | 180             | ПДМ осуществляет отгрузку руды |

В ходе проведения испытаний отмечено максимальное время нахождения ПДМ в камере и минимальное время ее отсутствия. Так, максимально ПДМ находится в камере 3,5 минуты, минимально отсутствует – 2 минуты.

На рисунках П.1 и П.2 приложения 1 приведены значения измеренных концентраций газов на выходе из разрезной выработки очистной камеры при работе ПДМ. По результатам натурных измерений концентрации вредных компонентов выхлопных газов не достигают ПДК.

#### **2.2.2 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 10-8-2 на руднике «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель»**

Натурные исследования в очистной камере 10-8-2 на руднике «Таймырский» произведены в 2024 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память двух газоанализаторов, расположенных по разным бортам нарезной выработки.

На рисунках 2.7, 2.8 представлены план и разрез из проекта отработки запасов в камере 10-8-2 подземного рудника «Таймырский».

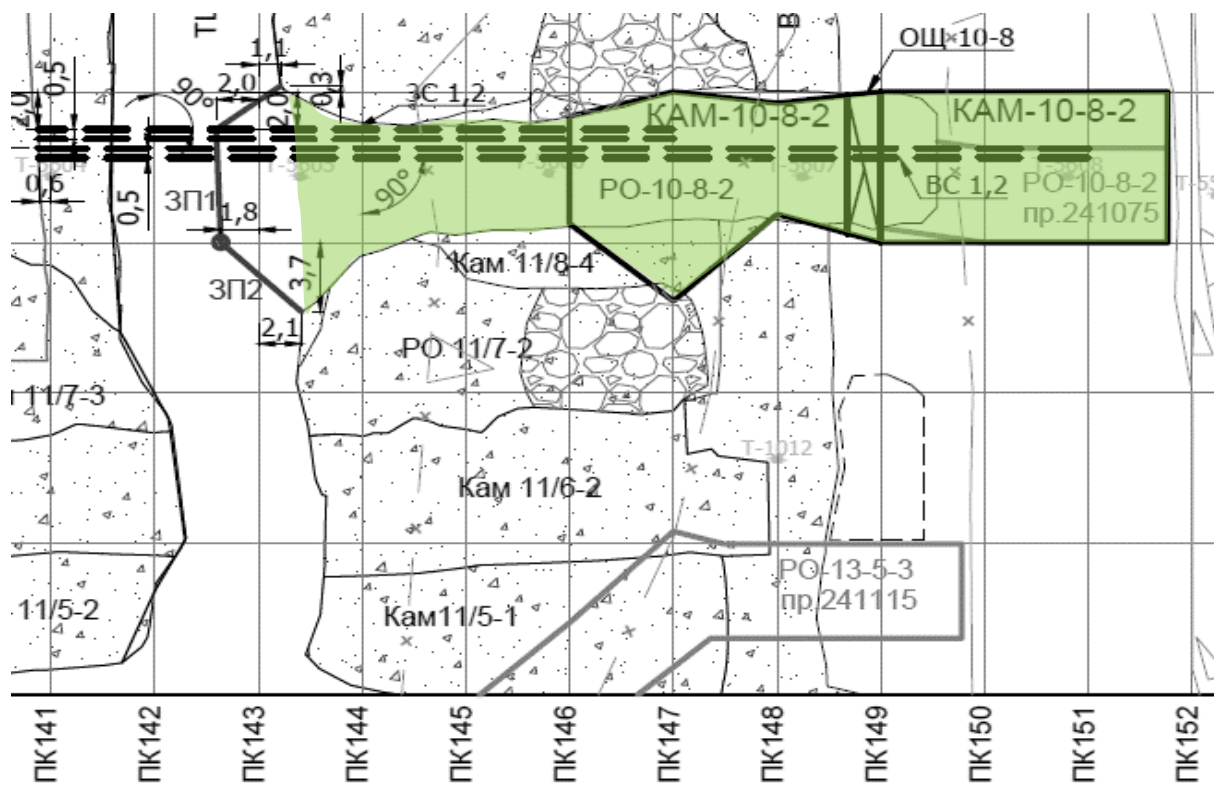
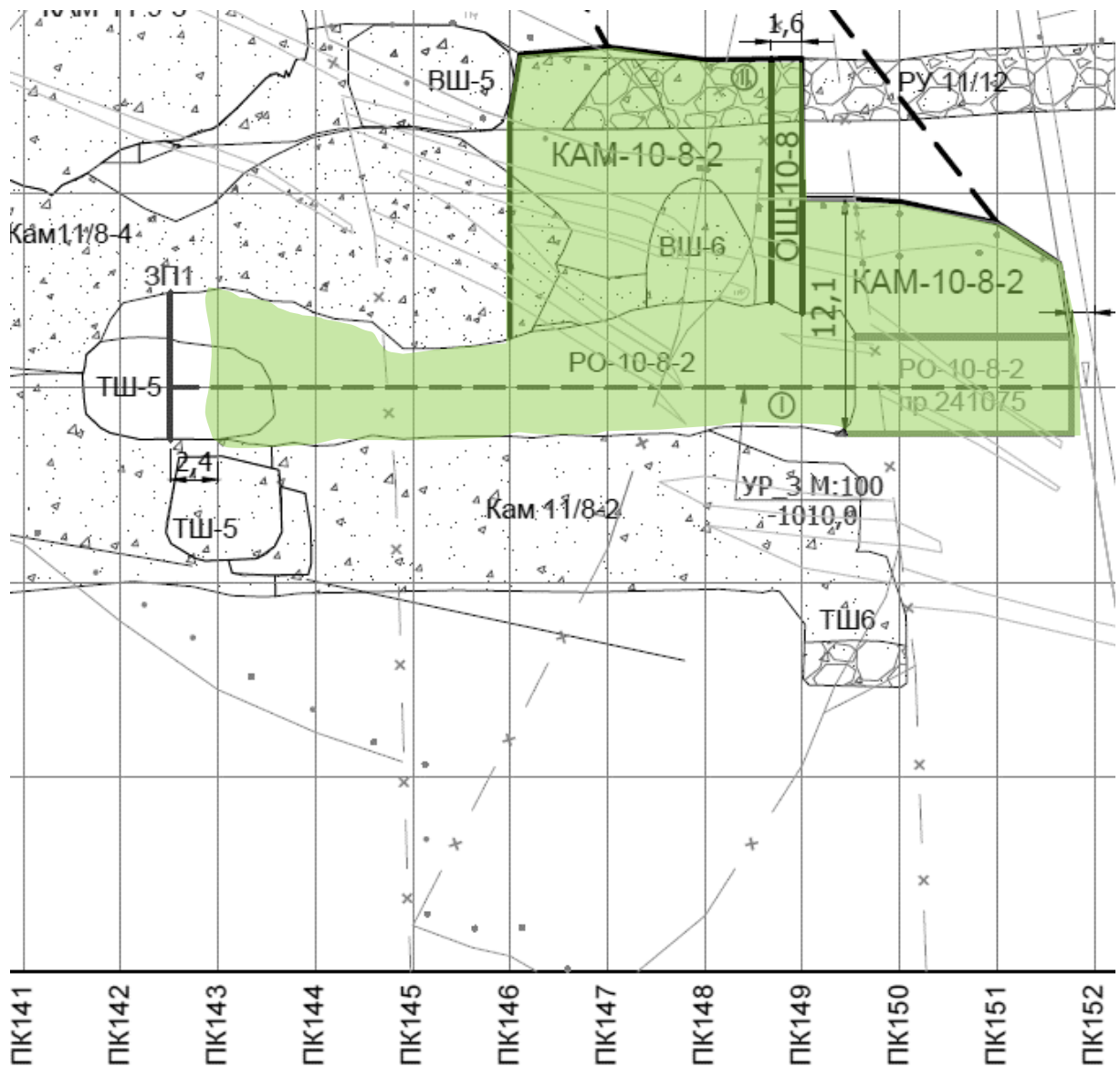


Рисунок 2.7 – Очистная тушиковая камера 10-8-2 в плане



**Рисунок 2.8 – Очистная тупиковая камера 10-8-2 в разрезе**

На момент проведения натуральных измерений обработка камеры ведется в пределах ПК 146 и ПК 152, длина тупиковой части камеры составляет 30 м, длина нарезной выработки РО-10-8-2 составляет 14 м.

На рисунках П.3, П.4, П.5 приложения 1 приведены результаты определения концентраций вредных компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ ) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при отгрузке руды из очистной тупиковой камеры 10-8-2 подземного рудника «Таймырский» на рабочем месте машиниста. По результатам натуральных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых по  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ . По  $\text{CO}$  имеются локальные превышения предельно-допустимой концентрации, связанные с наличием газов во взорванной горной массе.

### 2.2.3 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 1-1-1 на руднике «Комсомольский» ПАО «ГМК «Норильский никель»

Натурные исследования в очистной камере 1-1-1 в 2018 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память газоанализаторов.

На рисунках 2.9, 2.10 представлены план и разрез из проекта отработки запасов в камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский». Представленные в проекте геометрические параметры очистной тупиковой камеры использованы при разработке математической модели проветривания.

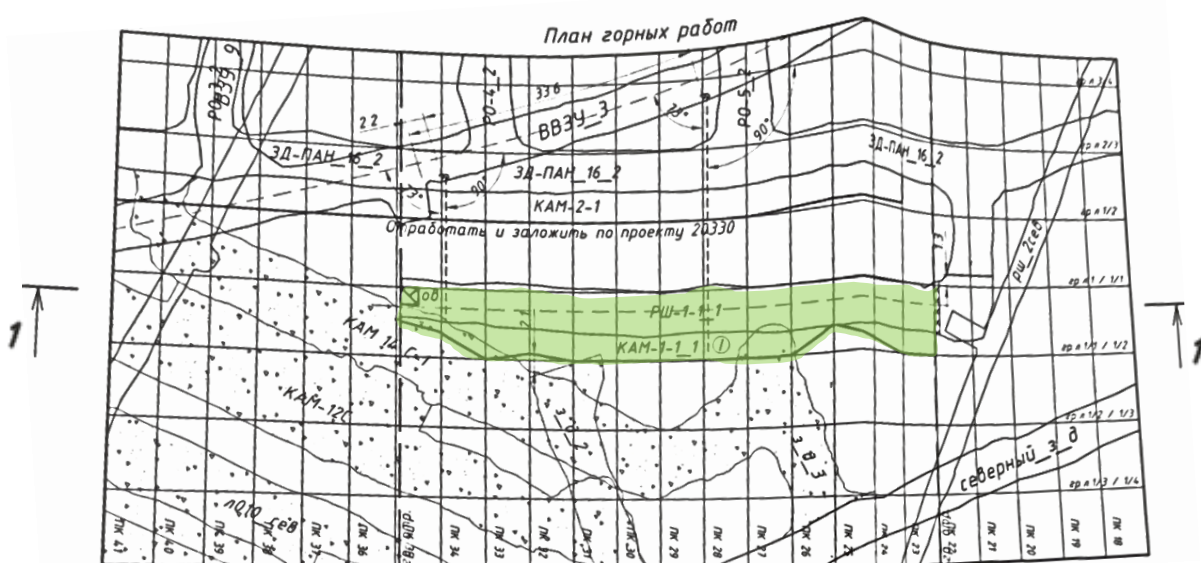
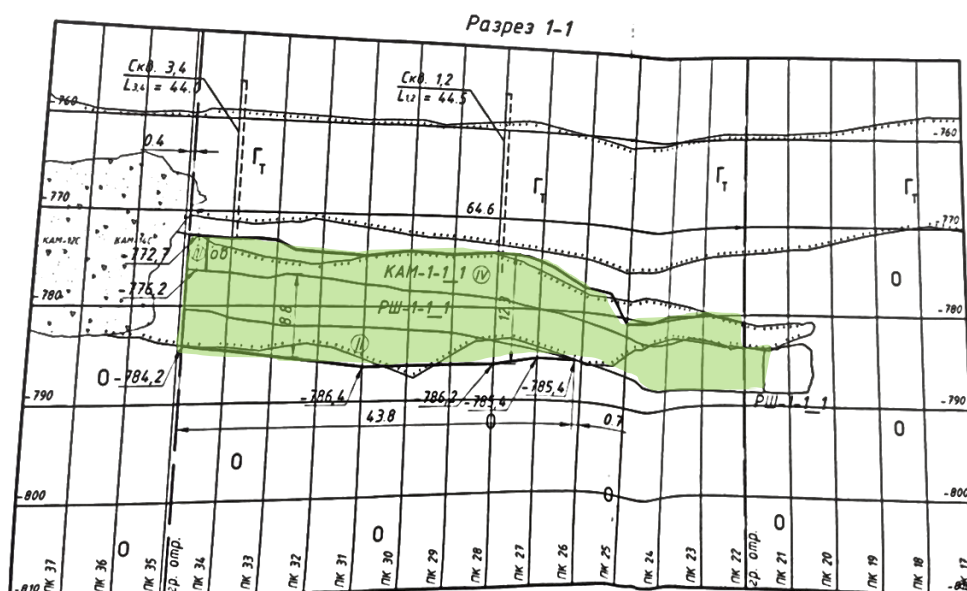


Рисунок 2.9 – Очистная тупиковая камера 1-1-1 в плане



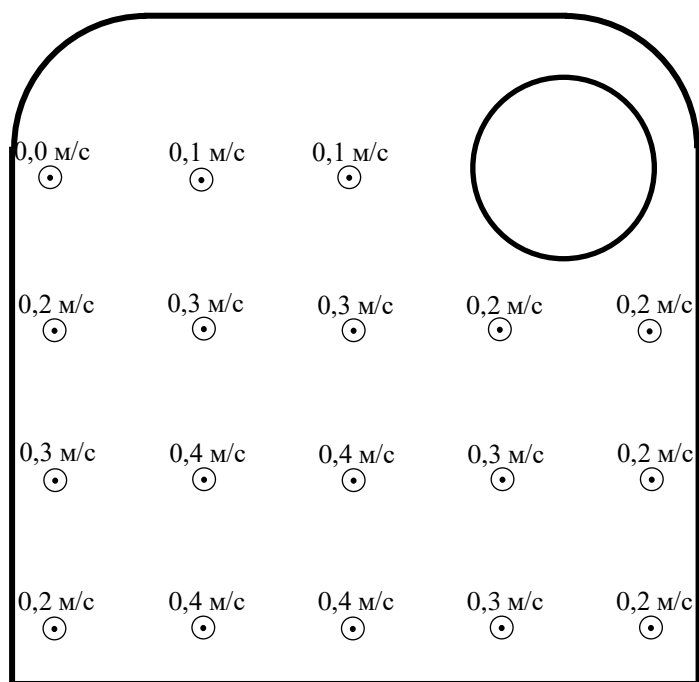
**Рисунок 2.10 – Очистная тупиковая камера 1-1-1 в разрезе**

На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах ПК 28 и ПК 35, длина тупиковой части камеры составляет 40 м, длина нарезной выработки РШ-1-1-1 составляет 44,4 м.

В ходе натуральных измерений аэродинамических параметров проветривания камеры произведены измерения поля скоростей движения воздуха в поперечном сечении разрезной выработки очистной тупиковой камеры РШ-1-1-1 на расстоянии 12,4 м от сопряжения разрезной выработки с выработкой со сквозной струей проветривания. Величина исследуемого поперечного сечения равна  $21,4 \text{ м}^2$  (ширина – 5,1 м, высота – 4,2 м).

На рисунке 2.11 представлены результаты измерения поля скоростей движения воздуха (среднее по трем измерениям) в исследуемом сечении по сетке 1 м на 1 м.





⊙ - выходит из камеры

**Рисунок 2.11 – Результаты измерения поля скоростей движения воздуха в исследуемом сечении**

В таблице 2.3 приведен фактический график работы ПДМ в очистной камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 2.3 – График работы ПДМ в очистной камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский»

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 0-300                   | 300      | ПДМ отсутствует                |
| 300-550                 | 250      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 550-860                 | 310      | ПДМ отсутствует                |
| 860-960                 | 100      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 960-1290                | 330      | ПДМ отсутствует                |
| 1290-1670               | 380      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1670-1760               | 90       | ПДМ отсутствует                |
| 1760-2700               | 940      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |

На рисунках П.6, П.7, П.8 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ ) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при отгрузке руды из очистной тупиковой камеры 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский» на рабочем месте машиниста. По результатам натурных измерений, концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего

сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых по NO и NO<sub>2</sub>. По СО имеется превышение предельно-допустимой концентрации, это связано с тем фактом, что в пространство очистной камеры подается количество воздуха существенно ниже расчетного. При проведении измерений подается 5,4 м<sup>3</sup>/с при расчетных 13,7 м<sup>3</sup>/с.

#### 2.2.4 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-02-69з-1 на руднике «Комсомольский» ПАО «ГМК «Норильский никель»

Натурные исследования в очистной камере КАМ-02-69з-1 на руднике «Комсомольский» произведены в 2024 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память двух газоанализаторов, расположенных по разным бортам нарезной выработки.

На рисунках 2.13, 2.13 представлены план и разрез из проекта отработки запасов в камере КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский».

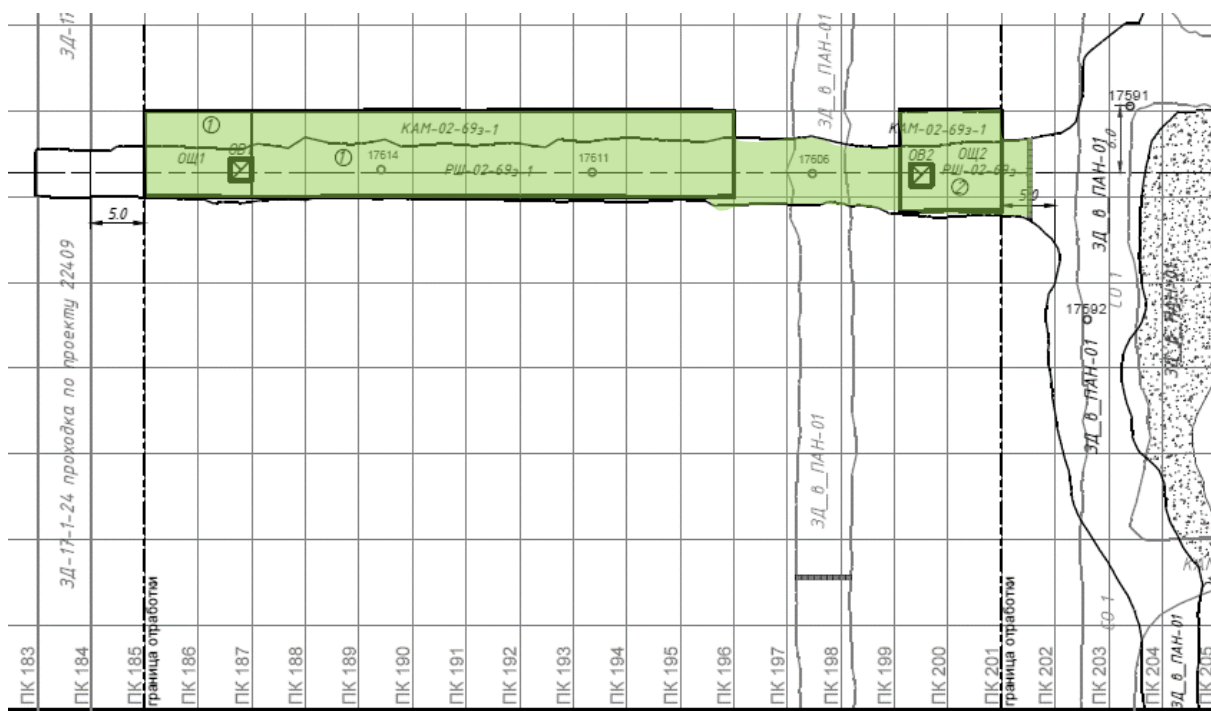
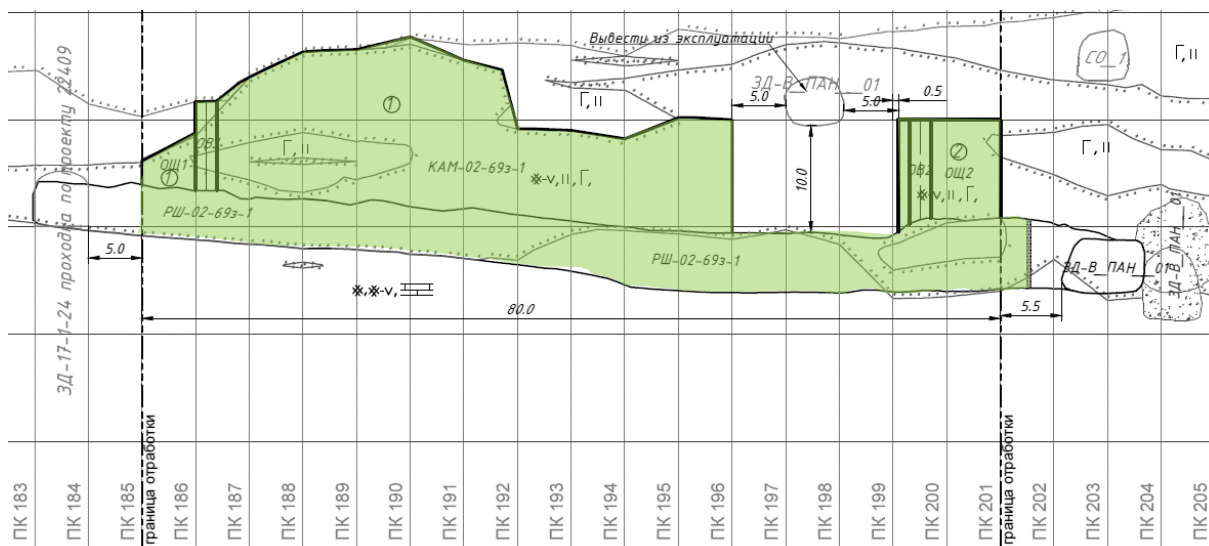


Рисунок 2.12 – Очистная тупиковая камера КАМ-02-69з-1 в плане



**Рисунок 2.13 – Очистная тупиковая камера КАМ-02-69з-1 в разрезе**

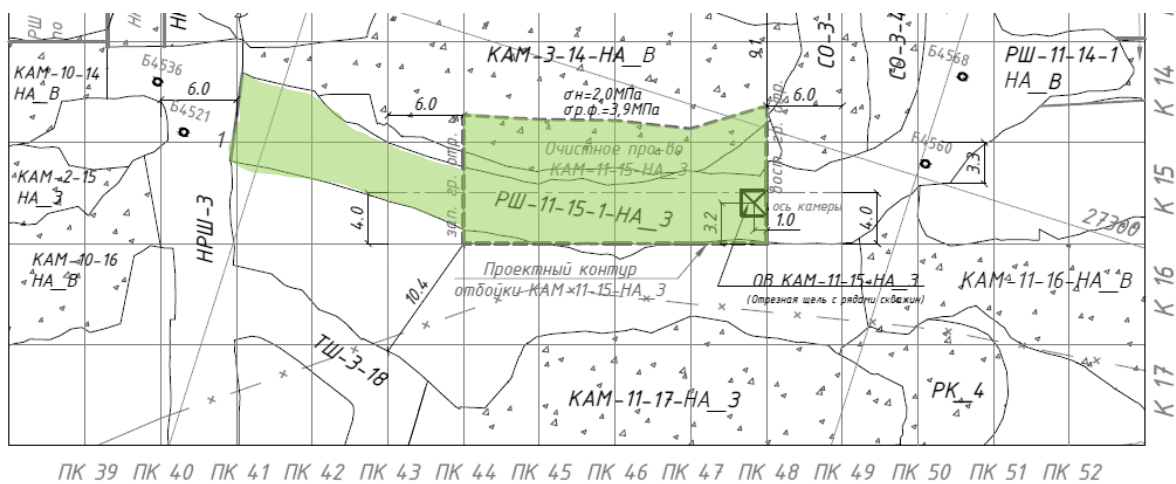
На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах ПК 185 и ПК 191, длина тупиковой части камеры составляет 30 м, длина нарезной выработки РШ-02-69з-1 составляет 55 м.

На рисунках П.9, П.10, П.11 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ ) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при отгрузке руды из очистной тупиковой камеры КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский» на рабочем месте машиниста. По результатам натуральных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых по  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ . По  $\text{CO}$  имеются локальные превышения предельно-допустимой концентрации, связанные с наличием газов во взорванной горной массе.

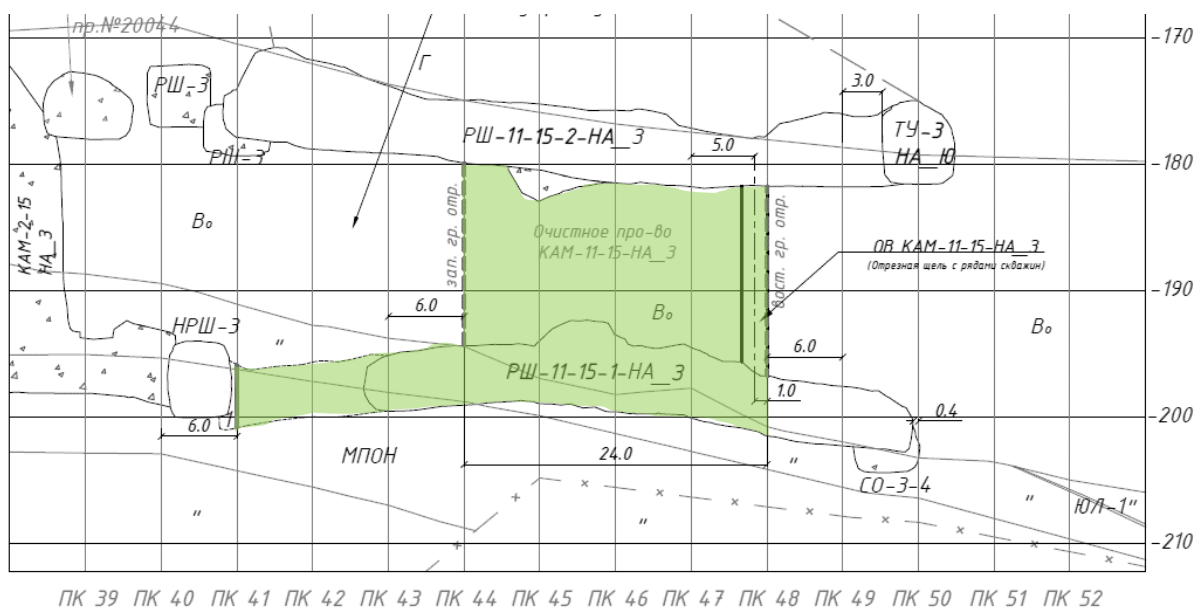
### **2.2.5 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-11-15-НА\_3 на руднике «Маяк» ПАО «ГМК «Норильский никель»**

Натурные исследования в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 в 2018 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память газоанализаторов.

На рисунках 2.14, 2.15 представлены план и разрез камеры КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк». Представленные в проекте геометрические параметры очистной тупиковой камеры использованы при разработке математической модели проветривания.



**Рисунок 2.14 – Очистная тупиковая камера КАМ-11-15-1-НА\_3 в плане**

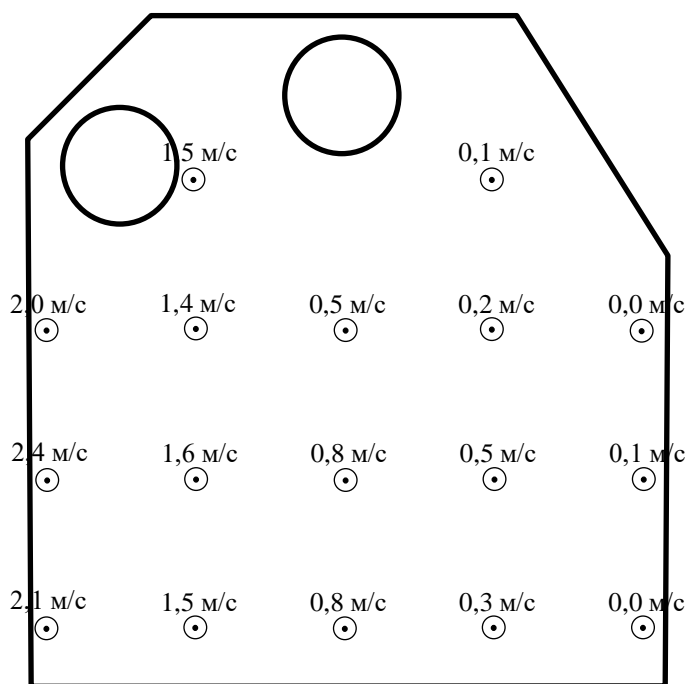


**Рисунок 2.15 – Очистная тупиковая камера КАМ-11-15-1-НА\_3 в разрезе**

На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах ПК 44 и ПК 48, длина тупиковой части камеры составляет 20 м, длина нарезной выработки РШ-11-15-1-НА\_3 составляет 21,2 м.

В ходе натуральных измерений аэродинамических параметров проветривания камеры произведены измерения поля скоростей движения воздуха в поперечном сечении разрезной выработки очистной тупиковой камеры РШ-11-15-1-НА\_3 на расстоянии 6,42 м от сопряжения разрезной выработки с выработкой со сквозной струей проветривания. Величина исследуемого поперечного сечения равна  $18,9 \text{ м}^2$  (ширина – 4,25 м, высота – 4,45 м).

На рисунке 2.16 представлены результаты измерения поля скоростей движения воздуха (средние скорости) в исследуемом сечении по сетке 1 м на 1 м.



⊙ - выходит из камеры

**Рисунок 2.16 – Результаты измерения поля скоростей движения воздуха в исследуемом сечении**

В таблице 2.4 приведен фактический график работы ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 2.4 – График работы ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк»

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 0-50                    | 50       | ПДМ отсутствует                |
| 50-100                  | 50       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 100-125                 | 25       | ПДМ отсутствует                |
| 125-180                 | 55       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 180-590                 | 410      | ПДМ отсутствует                |
| 590-670                 | 80       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 670-1250                | 580      | ПДМ отсутствует                |
| 1250-1320               | 70       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1320-1360               | 40       | ПДМ отсутствует                |
| 1360-1500               | 140      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1500-1800               | 300      | ПДМ отсутствует                |

На рисунках П.12, П.13, П.14 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов (NO<sub>2</sub>, NO и CO) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при производстве процесса отгрузки руды из очистной

тупиковой камеры КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк». По результатам натуральных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых.

### 2.2.6 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-ЗД-2С на руднике «Маяк» ПАО «ГМК «Норильский никель»

Натурные исследования в очистной камере КАМ-ЗД-2С на руднике «Маяк» произведены в 2024 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось каждую секунду, при помощи записи значений в память двух газоанализаторов, расположенных по разным бортам нарезной выработки.

На рисунке 2.18 представлены планы и разрезы проекта отработки запасов в камере КАМ-ЗД-2С подземного рудника «Маяк».

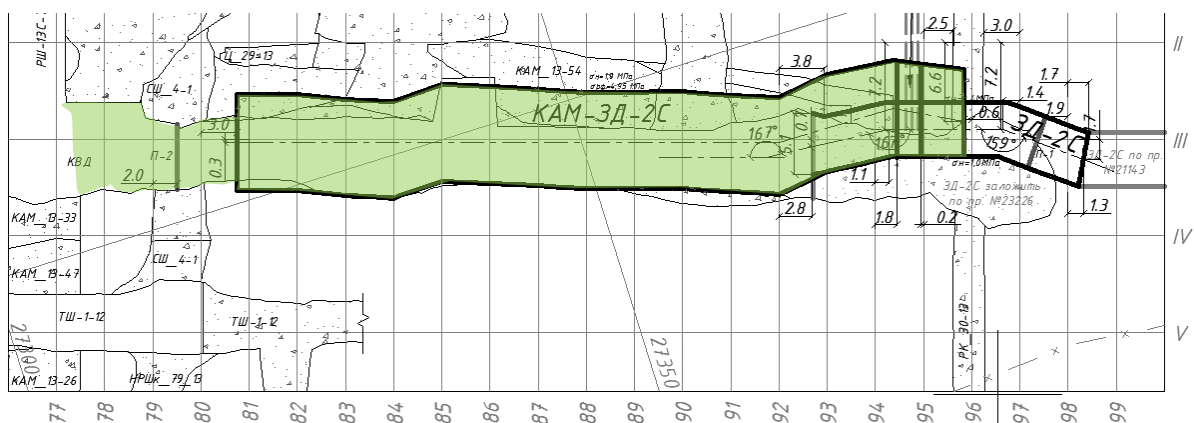


Рисунок 2.17 – Очистная тупиковая камера КАМ-ЗД-2С в плане

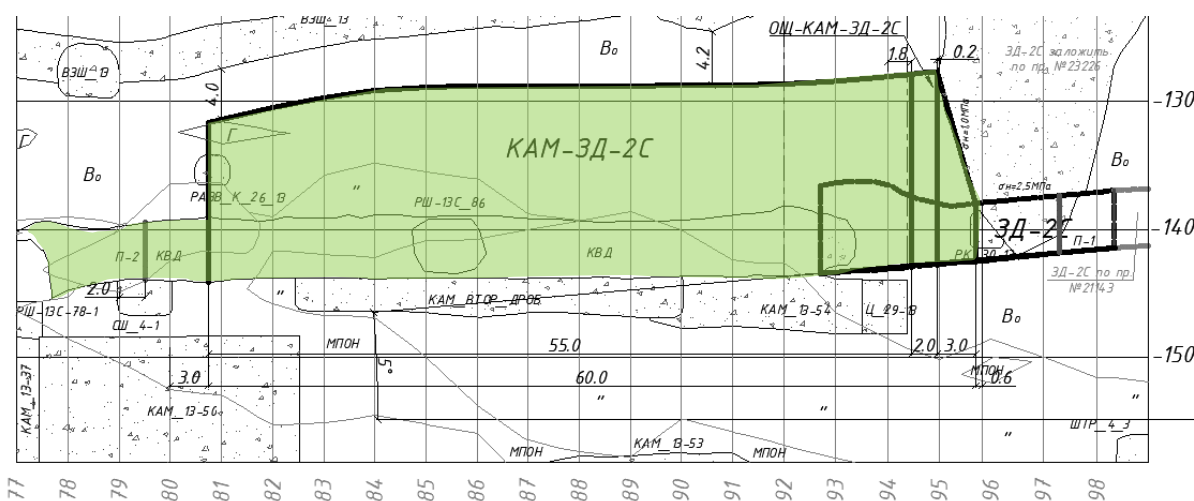


Рисунок 2.18 – Очистная тупиковая камера КАМ-ЗД-2С в разрезе

На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах ПК 90 и ПК 95, длина тупиковой части камеры составляет 25 м, длина нарезной выработки КВД составляет 60 м.

На рисунках П.15, П.16, П.17 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ ) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при отгрузке руды из очистной тупиковой камеры КАМ-ЗД-2С подземного рудника «Маяк» на рабочем месте машиниста. По результатам натуральных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых по  $\text{NO}$ . По  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_2$  имеются локальные превышения предельно-допустимой концентрации, связанные с наличием газов во взорванной горной массе.

#### **2.2.7 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 11\_7-1 на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель»**

Натурные исследования в очистной камере 11\_7-1 в 2018 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память газоанализаторов.

На рисунке 2.20 представлены планы и разрезы проекта отработки запасов в камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский». Представленные в проекте геометрические параметры очистной тупиковой камеры использованы при разработке геометрической модели проветривания.

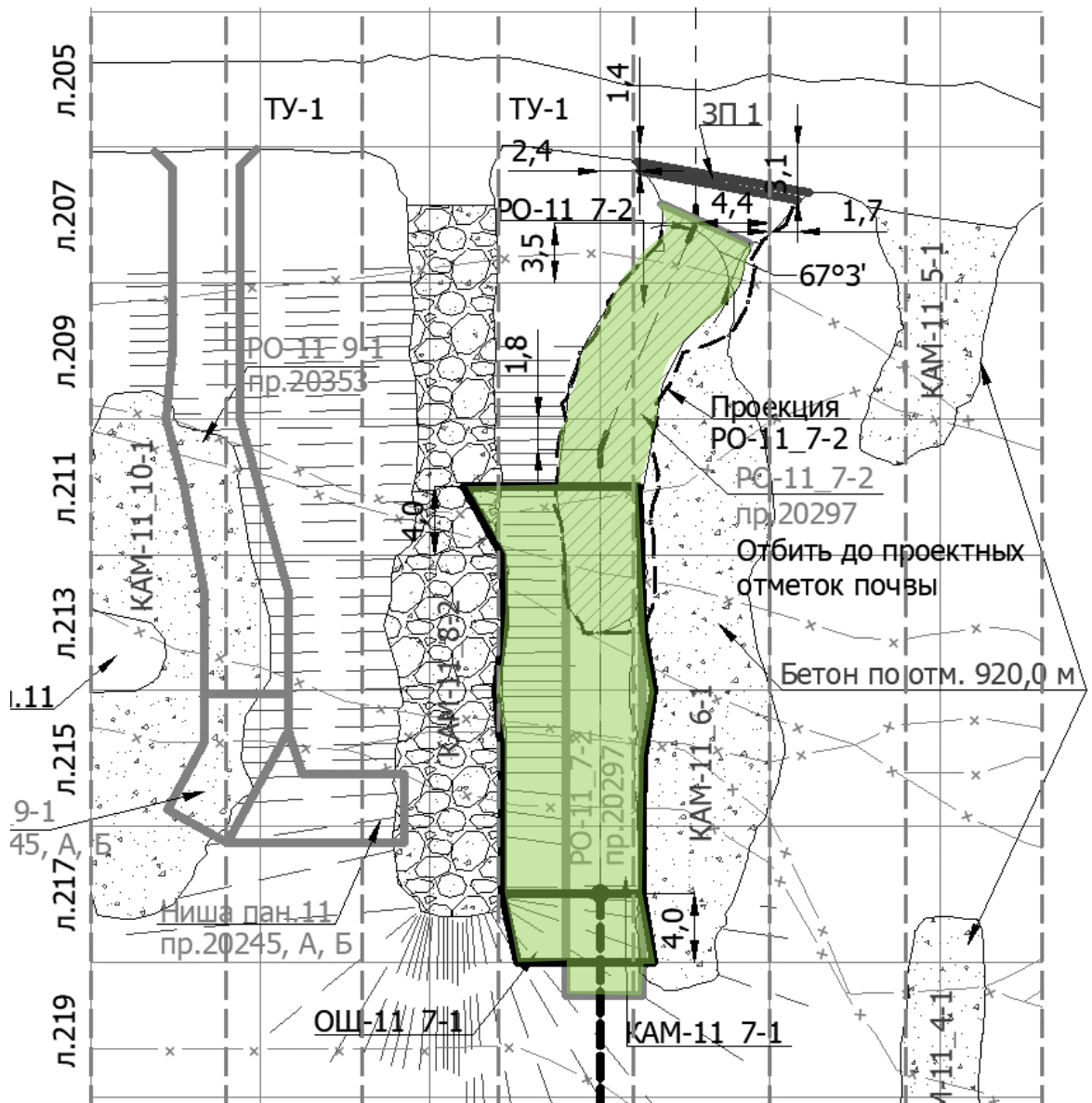


Рисунок 2.19 – Очистная тупиковая камера 11\_7-1 в плане

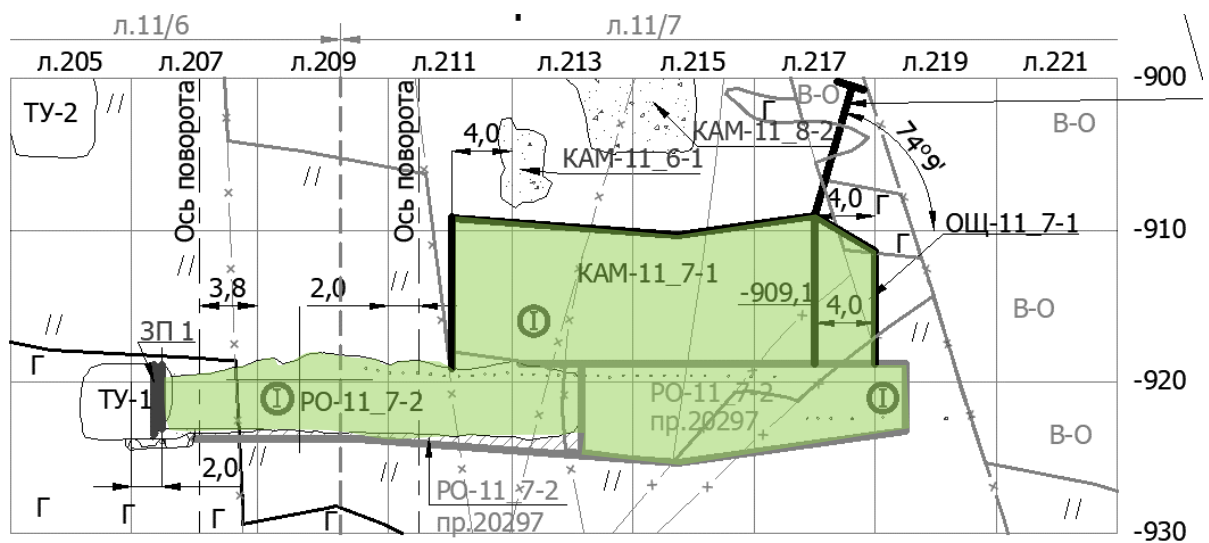


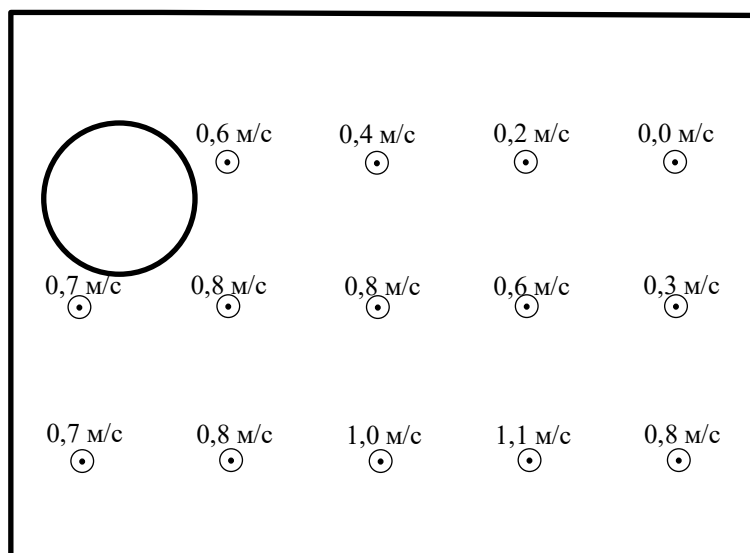
Рисунок 2.20 – Очистная тупиковая камера 11\_7-1 в разрезе



На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах л. 215 и л. 217, длина тупиковой части камеры составляет 16 м, длина нарезной выработки РО 11\_7-2 составляет 25,8 м.

В ходе натуральных измерений аэродинамических параметров проветривания камеры произведены измерения поля скоростей движения воздуха в поперечном сечении разрезной выработки очистной тупиковой камеры 11\_7-1 на расстоянии 6,6 м от сопряжения разрезной выработки с выработкой со сквозной струей проветривания. Величина исследуемого поперечного сечения равна 20,5 м<sup>2</sup> (ширина – 5,4 м, высота – 4,2 м).

На рисунке 2.21 представлены результаты измерения поля скоростей движения воздуха (средние скорости) в исследуемом сечении по сетке 1 м на 1 м.



⊙ - выходит из камеры

**Рисунок 2.21 – Результаты измерения поля скоростей движения воздуха в исследуемом сечении**

В таблице 2.5 приведен фактический графики работы ПДМ в очистной камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 2.5 – График работы ПДМ в очистной камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский»

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 0-10                    | 10       | ПДМ отсутствует                |
| 10-30                   | 20       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 30-250                  | 220      | ПДМ отсутствует                |
| 250-270                 | 20       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 270-520                 | 250      | ПДМ отсутствует                |
| 520-550                 | 30       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 550-1170                | 620      | ПДМ отсутствует                |
| 1170-1185               | 15       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1185-1430               | 245      | ПДМ отсутствует                |
| 1430-1600               | 170      | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1600-1800               | 200      | ПДМ отсутствует                |

На рисунках П.18, П.19, П.20 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов (NO<sub>2</sub>, NO и CO) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при производстве процесса отгрузки руды из очистной тупиковой камеры 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский». По результатам натуральных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых.

#### **2.2.8 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры КАМ-12\_15-2 (2ст.) на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель»**

Натурные исследования в очистной камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) на руднике «Октябрьский» произведены в 2024 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось каждую секунду, при помощи записи значений в память двух газоанализаторов, расположенных по разным бортам нарезной выработки.

На рисунках 2.22, 2.23 представлены планы и разрезы проекта отработки запасов в камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский».

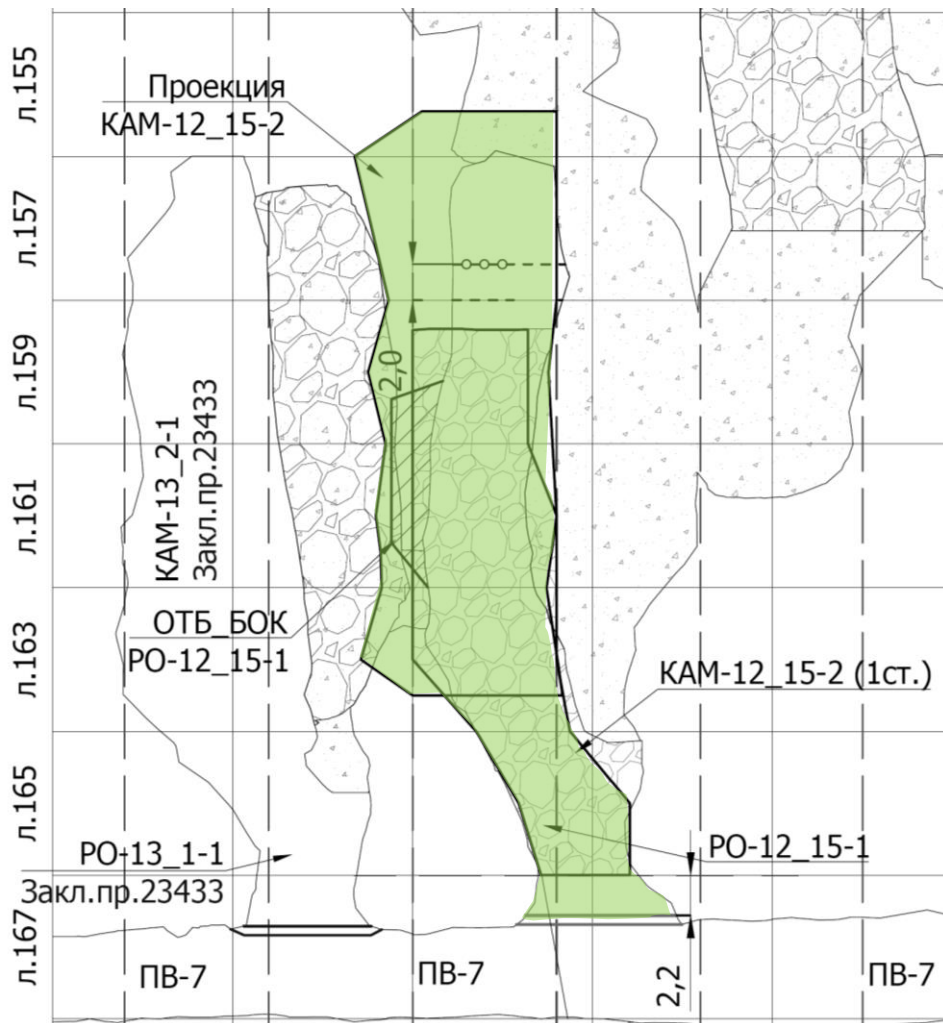


Рисунок 2.22 – Очистная тупиковая камера КАМ-12\_15-2 (2ст.) в плане

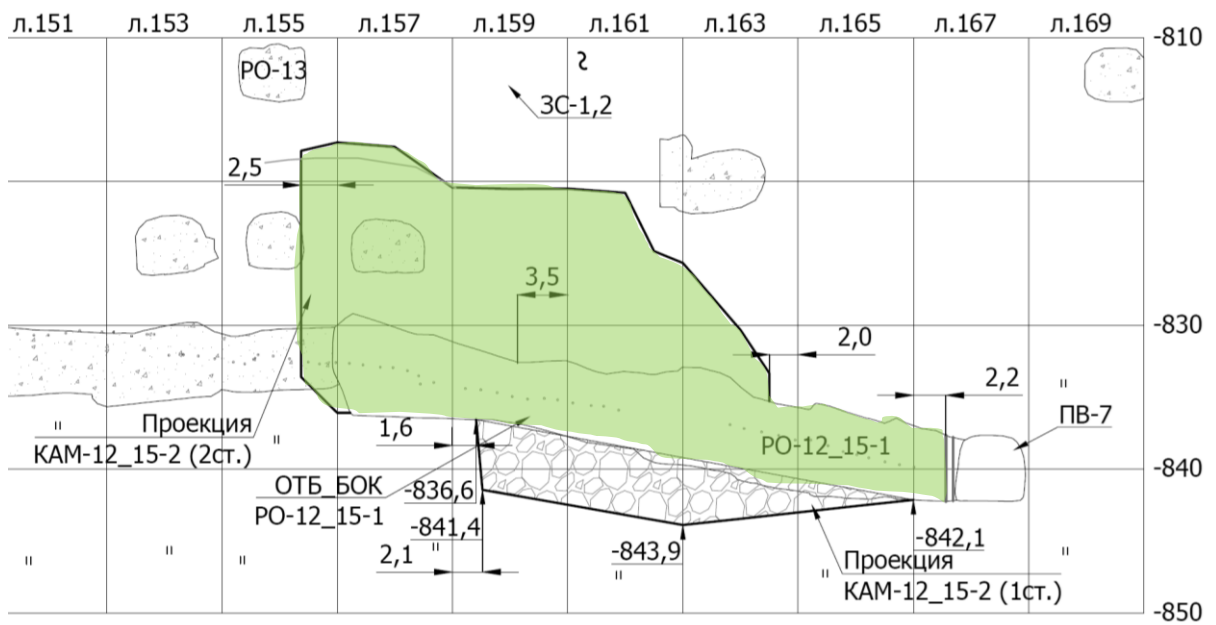


Рисунок 2.23 – Очистная тупиковая камера КАМ-12\_15-2 (2ст.) в разрезе

На момент проведения натурных измерений отработка камеры ведется в пределах л. 155+7,5 и л. 163, длина тупиковой части камеры составляет 32,5 м, длина нарезной выработки РО-12\_15-1 составляет 23 м.

На рисунках П.21, П.22, П.23 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ ) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при отгрузке руды из очистной тупиковой камеры КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский» на рабочем месте машиниста. По результатам натурных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых по  $\text{NO}$ . По  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_2$  имеются локальные превышения предельно-допустимой концентрации, связанные с наличием газов во взорванной горной массе.

### 2.2.9 Натурные исследования качественного состава исходящей струи воздуха из очистной тупиковой камеры 3-17-1 на руднике «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель»

Натурные исследования в очистной тупиковой камере 3-17-1 в 2018 году. Фиксирование концентраций газа в исходящей струе производилось ежесекундно, при помощи записи значений в память газоанализаторов.

На рисунках 2.24, 2.25 представлены план и разрез из проекта отработки запасов в камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый». Представленные в проекте геометрические параметры очистной тупиковой камеры использованы при разработке математической модели проветривания.

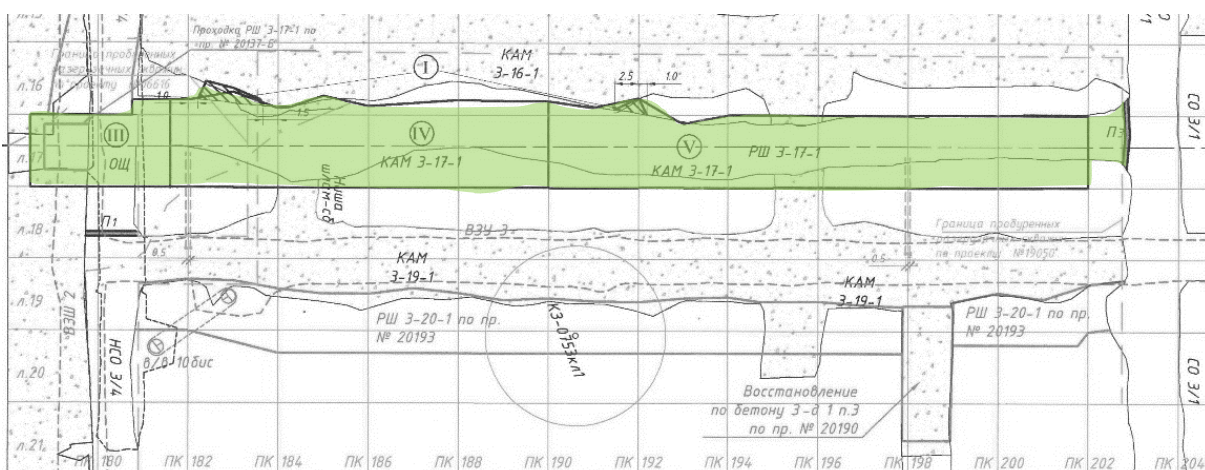
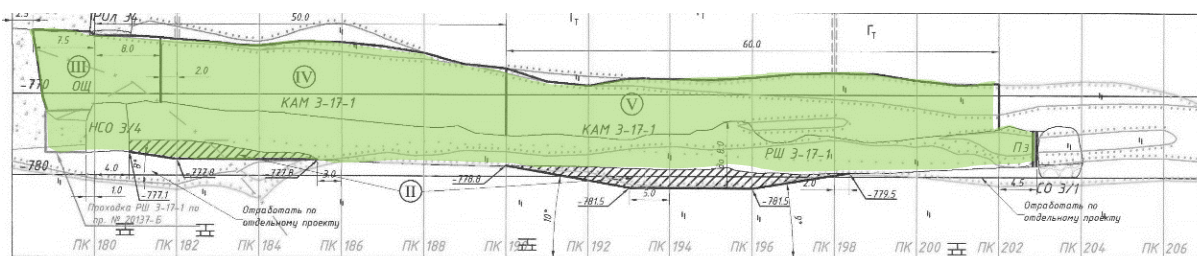


Рисунок 2.24 – Очистная тупиковая камера 3-17-1 в плане

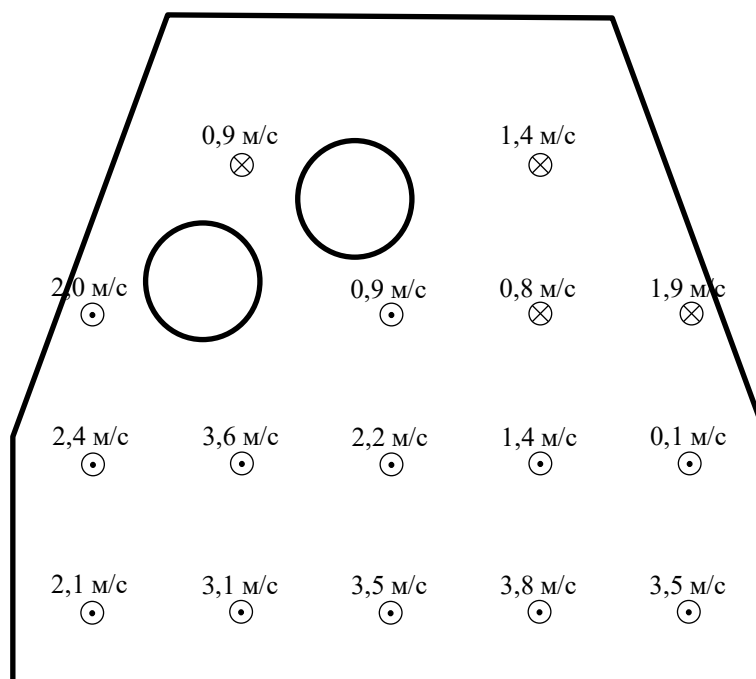


**Рисунок 2.25 – Очистная тупиковая камера 3-17-1 в разрезе**

На момент проведения натуральных измерений отработка камеры ведется в пределах ПК 192 и ПК 202, длина тупиковой части камеры составляет 25 м, длина нарезной выработки РШ 3-17-1 составляет 27,8 м.

В ходе натуральных измерений аэродинамических параметров проветривания камеры произведены измерения поля скоростей движения воздуха в поперечном сечении разрезной выработки очистной тупиковой камеры РШ 3-17-1 на расстоянии 4,72 м от сопряжения разрезной выработки с выработкой со сквозной струей проветривания. Величина исследуемого поперечного сечения равна 33 м<sup>2</sup> (ширина – 6 м, высота – 5,5 м).

На рисунке 2.26 представлены результаты измерения поля скоростей движения воздуха (средние скорости) в исследуемом сечении по сетке 1 м на 1 м.



- ⊗ - поступает в камеру
- ⊙ - выходит из камеры

**Рисунок 2.26 – Результаты измерения поля скоростей движения воздуха в исследуемом сечении**

В таблице 2.6 приведен фактический графики работы ПДМ в очистной камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Таблица 2.6 – График работы ПДМ в очистной камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый»

| Временной промежуток, с | Время, с | Цикл работы                    |
|-------------------------|----------|--------------------------------|
| 0-60                    | 60       | ПДМ отсутствует                |
| 60-120                  | 60       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 120-540                 | 420      | ПДМ отсутствует                |
| 540-600                 | 60       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 600-900                 | 300      | ПДМ отсутствует                |
| 900-960                 | 60       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 960-1680                | 720      | ПДМ отсутствует                |
| 1680-1740               | 60       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 1740-2100               | 360      | ПДМ отсутствует                |
| 2100-2160               | 60       | ПДМ осуществляет отгрузку руды |
| 2160-2220               | 60       | ПДМ отсутствует                |

На рисунках П.24, П.25, П.26 приложения 1 представлены результаты определения концентраций вредных компонентов (NO<sub>2</sub>, NO и CO) выхлопных газов погрузочно-доставочной машины при производстве процесса отгрузки руды из очистной тупиковой камеры 3-17-1 рудника «Скалистый». По результатам натурных измерений концентрации газов на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при работе техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры не превышают предельно-допустимых.

### 2.3 Анализ графика работы машин

Анализируя данные в таблицах 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 можно сделать вывод, что среднее время нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры при нормальных условиях отгрузки составляет от 1 до 3,5 минут.

### 2.4 Анализ концентраций вредных веществ в исходящей струе

Произведен анализ данных натурных измерений. Сравнение полученных концентраций сравнены с регламентными значениями (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Сравнение полученных в ходе экспериментов величин концентраций с ПДК и возможные причины возникновения превышения

| Камера | Превышение предельно-допустимой концентрации |       | Возможная причина |
|--------|--|-------|-------------------|
|        | по NO <sub>2</sub>                           | по CO |                   |
| 10-9-1 | нет  | нет   |                   |

| Камера              | Превышение предельно-допустимой концентрации |               | Возможная причина                                 |
|---------------------|--|---------------|---|
|                     | по NO <sub>2</sub>                           | по CO         |   |
| 10-8-2              | нет  | да            | скопление газов от ВР в отбитой руде              |
| 1-1-1               | нет  | да            | недостаточное количество воздуха на проветривание |
| КАМ-02-69з-1        | нет  | да            | скопление газов от ВР в отбитой руде              |
| КАМ-11-15-НА 3      | нет  | нет           |   |
| КАМ-3Д-2С           | да   | да            | скопление газов от ВР в отбитой руде              |
| 11_7-1              | нет  | нет           |   |
| КАМ-12_15-2 (2 ст.) | да   | да            | скопление газов от ВР в отбитой руде              |
| 3-17-1              | нет  | нет           |   |
| <b>Итого:</b>       | <b>2 из 9</b>                                | <b>5 из 9</b> |   |

По результатам анализа временной динамики концентраций газов (NO, NO<sub>2</sub>, CO) в двух из девяти случаев наблюдается превышение ПДК по NO<sub>2</sub>, в пяти из девяти – по CO.

В качестве возможных причин превышения предельно-допустимых значений отмечены: скопление газов от взрывных работ как в камерном пространстве, так и в отбитой горной массе; также недостаточное количество воздуха, поступающего на проветривание тупиковой камеры.

## 2.5 Выводы по главе

В результате исследования качественного состава рудничной атмосферы в исходящей струе очистных тупиковых камерообразных горных выработок можно сделать следующие выводы:

- В процессе работы горнорабочего в рабочей зоне очистной тупиковой камеры наибольшее количество газа выделяется от техники с двигателем внутреннего сгорания, а также газов от взрывных работ, запертых в очистном пространстве тупиковых камер большого сечения после ведения взрывных работ.
- Разработана методика проведения измерений качественного состава исходящей струи из тупиковых камерообразных горных выработок, позволяющая получить динамику изменения концентраций газа на рабочем месте машиниста ПДМ.
- Проведенные натурные измерения качественного состава исходящей струи из тупиковых камерообразных горных выработок свидетельствуют об экспоненциальном характере зависимости возрастания и снижения концентраций в рабочей зоне, что характерно для тупиковых выработок малого сечения.
- Среднее время нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры при нормальных условиях отгрузки составляет от 1 до 3,5 минут.
- По результатам анализа временной динамики концентраций газов ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) в двух из девяти случаев наблюдается превышение ПДК по  $\text{NO}_2$ , в пяти из девяти – по  $\text{CO}$ .

Проведенные исследования динамики изменения концентраций газа на рабочем месте машиниста ПДМ позволяют осуществить параметризацию и валидацию численной трехмерной модели процесса проветривания тупиковой очистной выработки большого сечения.



### 3 РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ОЧИСТНОЙ ТУПИКОВОЙ КАМЕРООБРАЗНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ С ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К НЕЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Необходимость разработки численной модели проветривания очистной тупиковой камерообразной горной выработки продиктована запретом на нахождение людей в пространстве очистной камеры. Таким образом наиболее доступным способом изучения процессов проветривания таких выработок является математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Вычислительная гидрогазодинамика, являясь одним из направлений механики сплошных сред, включает в себя совокупность математических, физических и численных методов, используемых для расчета характеристик потоков жидкостей и газов на основе численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих физику потоков жидкостей и газов, их взаимодействие с твердыми телами [76]. При этом вычислительная гидрогазодинамика позволяет исследователю делать прогноз, что произойдет с потоком жидкости или газа при том или ином наборе начальных и граничных условий, геометрии расчетной области, физических параметров жидкости или газа.

#### 3.1 Математическая постановка задачи эффективности проветривания тупиковой камеры большого сечения

Описание движения воздушных потоков базируется на решении основных уравнений гидрогазодинамики, которые выражают фундаментальные физические принципы динамики жидкости и газа: законы сохранения массы, импульса и энергии.

Закон сохранения массы (уравнение неразрывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\vec{v}$  – поле скорости, м/с;  $\nabla$  – векторный дифференциальный оператор, м<sup>-1</sup>.

Закон сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса):

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g}, \quad (3.2)$$

где  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p$  – поле давления, Па;  $\vec{\tau}$  – тензор вязких напряжений, для воздуха определяемый уравнением:

$$\vec{\tau} = \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \vec{v})\vec{I}, \quad (3.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\vec{I}$  – единичный тензор.

Закон сохранения энергии (первый закон термодинамики):

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{v}) = \rho \dot{q} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \nabla \cdot (p \vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{v}, \quad (3.4)$$

где  $\dot{q}$  – удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/кг;  $T$  – температура, К;  $e$  – внутренняя энергия единицы массы, Дж/кг;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Термодинамическая составляющая физики процесса переноса газовой смеси в данной работе не рассматривается ввиду малой локализации, перенос газа от источника до горнорабочего происходит на расстоянии 10-50 м [50].

Движение воздушных и газовых потоков в горных выработках протекает в режиме развитой турбулентности.

### 3.2 Численный расчет процесса проветривания тупиковой камеры большого сечения

Существует множество программных CFD-пакетов: Ansys Fluent, Ansys CFX, Comsol Multiphysics, FlowVision, OpenFOAM, Star-CCM+, XFlow и другие. Методы CFD необходимы к применению, когда всесторонний анализ с использованием физических экспериментов невозможен, поскольку требует дорогостоящего оборудования, большого количества времени и необходимости попадания в труднодоступные, а зачастую запрещенные к посещению места шахт и рудников. Поскольку вычислительные затраты на CFD-моделирование снижаются в результате увеличения мощностей компьютеров, а стоимость физических экспериментов, как правило, увеличивается, объем физических экспериментов может быть значительно сокращен с использованием CFD-методов. Многие из сегодняшних проблем в рудничной вентиляции требуют как анализа, так и визуализации течения потоков воздуха, газов, пыли в сложных геометрических областях, и CFD-пакеты являются универсальным инструментом в этом отношении.

Для моделирования процесса накопления и выноса вредных компонентов, образующихся при работе машин с двигателем внутреннего сгорания (CO и NO<sub>x</sub>), из камерного пространства вследствие работы в тупиковых горных выработках погрузочно-доставочных машин с двигателем внутреннего сгорания использован модуль CFX программного комплекса ANSYS.

Для моделирования газовой динамики в очистных тупиковых горных выработках в данной работе использован численный метод RANS (основан на решении уравнений Рейнольдса, полученных в результате осреднения уравнений Навье-Стокса).

Обоснование выбора данного метода представлено в соответствующей главе литературного обзора (раздел 1.3.3).

Для определения полей скоростей воздуха при моделировании с использованием численного метода RANS используются усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса [81,136]:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{V} - \nabla \cdot R + \vec{F}, \quad (3.5)$$

где  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\vec{V}$  – вектор усредненной по Рейнольдсу скорости;  $R$  – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса;  $\vec{F}$  – плотность усредненной сторонней объемной силы;  $t$  – время;  $\nabla$  – дифференциальный оператор Гамильтона;  $\Delta$  – оператор Лапласа.

$$R = \rho \nu_t (\nabla \vec{V} + V \vec{\nabla}) - \frac{2}{3} \rho k E, \quad (3.6)$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\nu_t = \mu_t / \rho$  – кинематическая турбулентная вязкость;  $\mu_t$  – динамическая турбулентная вязкость;  $E$  – единичный тензор.

По результатам анализа литературы, приведенном в разделе 1.3.4, для моделирования газовой динамики в очистных тупиковых горных выработках в данной работе использована стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

При определении кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  использована стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности с масштабируемыми пристеночными функциями [73,95,106,118]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k V) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2 \mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon V) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t E_{ij} E_{ij} - \frac{C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2}{k}, \quad (3.8)$$

где  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$  — константы модели;  $\varepsilon$  – турбулентная энергия диссипации.

В рамках модели турбулентности standard k-epsilon динамическая турбулентная вязкость  $\mu_t$  определяется по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.9)$$

где  $C_\mu$  – константа модели.

Для замыкания системы (3.5)-(3.8) используется уравнение неразрывности в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0. \quad (3.10)$$

Система уравнений (3.5)-(3.10) с необходимыми начальными и граничными условиями позволяет определить распределение скоростей и давления воздуха в рассматриваемой расчетной области.

### 3.3 Параметрическое обеспечение модели

Исследование процессов переноса газовых примесей в тупиковых камерах большого сечения методами численного трехмерного моделирования состоит из нескольких этапов со следующей последовательностью:

- построение геометрии исследуемого объекта;
- постановка граничных и начальных условий;
- исследование сеточной сходимости и шага по времени (критерий Куранта-Фридрихса-Леви);
- постобработка полученного решения на предмет выявления влияния тех или иных физических процессов, протекающих в тупиковых камерах.

#### 3.3.1 Геометрическая модель

Рассматриваемым в работе объектом является очистная тупиковая камера большого сечения, которая формируется следующим образом:

1. Проводится нарезная выработка, сечением достаточным для беспрепятственного проезда шахтной техники;
2. В кровлю нарезной выработки с расчетным шагом разбуриваются шпуры и заряжаются (при этом в конце нарезной выработки с помощью применения замедленного взрывания формируется отрезная щель на проектную высоту камеры);
3. Производятся взрывные работы.

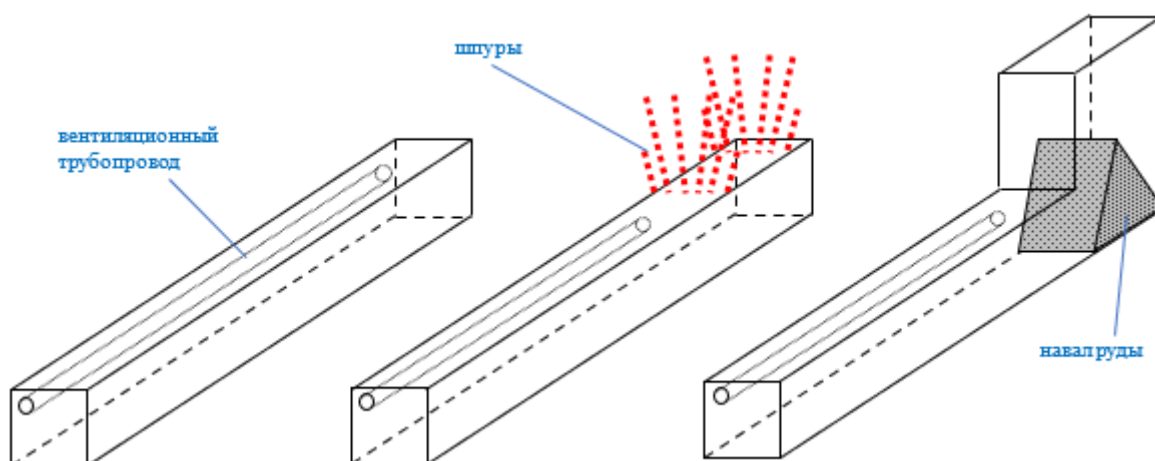


Рисунок 3.1 – Стадийность ведения горных работ в тупиковых камерах

В качестве геометрии исследуемой области выбрана обобщенная очистная тупиковая камера, геометрические параметры которой соответствуют параметрам очистных тупиковых горных выработок подземных рудников Талнахского рудного узла (РФ, Красноярский край):

- площадь сечения нарезной выработки соответствует минимально возможной для проезда шахтного автосамосвала и навешивания вентиляционного трубопровода – 36 м<sup>2</sup>;
- максимальная высота камерного пространства соответствует высоте подэтажа – 15 м;
- ширина камерного пространства соответствует ширине ленты – 8 м;
- длина камерного пространства – 30 м;
- диаметр вентиляционного трубопровода – 1 м.

### 3.3.2 Граничные условия

Течение воздуха повсеместно происходит в режиме развитой турбулентности.

На выходе из вентиляционных трубопроводов задается интенсивность турбулентности  $I_{turb} = 2\%$ , масштаб вихрей турбулентности  $l_{turb} = 0,2$  м. Воздушный поток, омывая очистную камеру и нарезной штрек, покидает расчетную область через поверхность, на которой задается нулевое статическое давление [13,30,45]. На стенках горных выработок задается «прилипание» потока. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок.

Граничными условиями при разработке математической модели проветривания тупиковой очистной камеры являются аэродинамические параметры проветривания – скорость движения воздуха из вентиляционных трубопроводов.

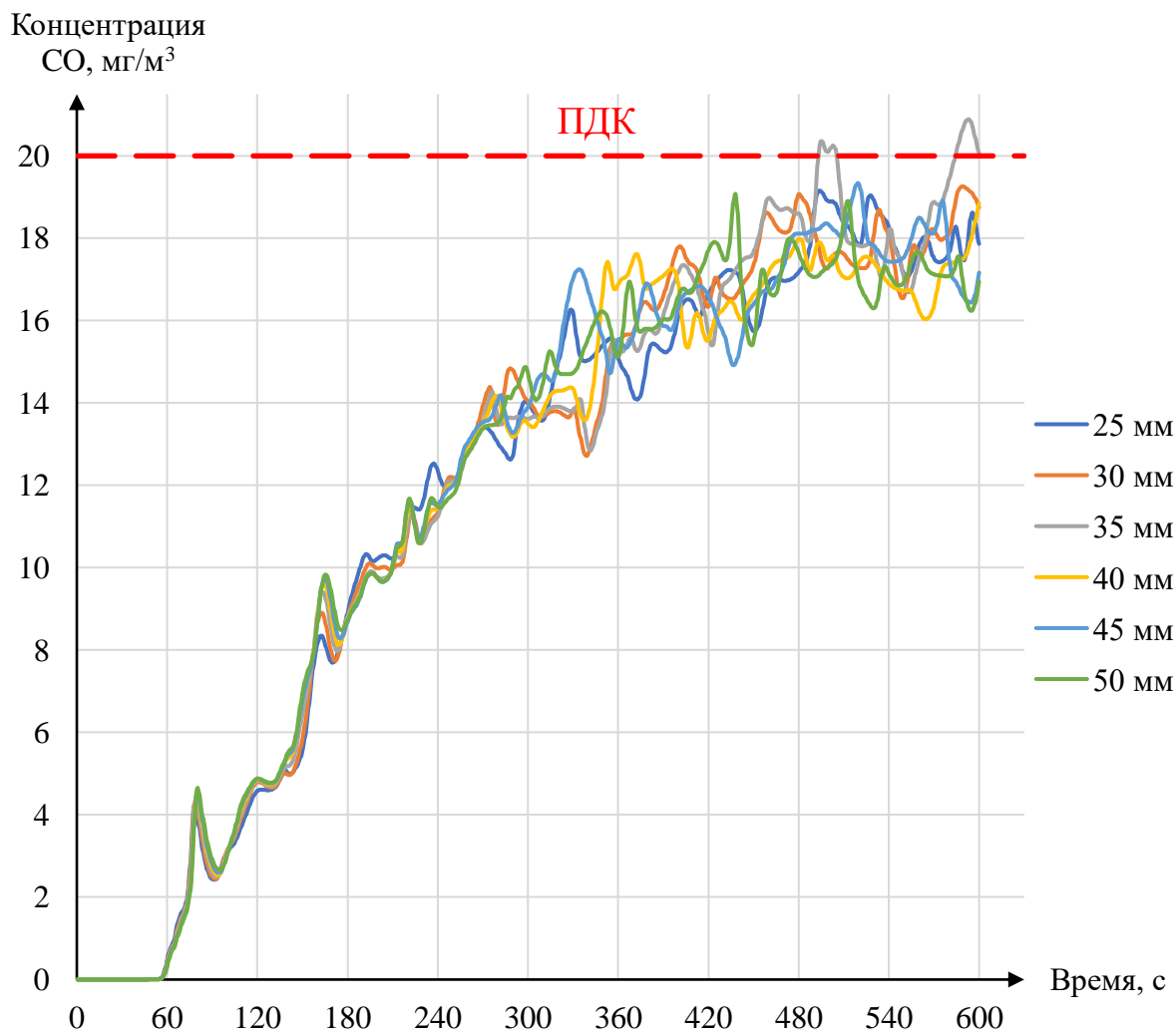
### 3.3.3 Исследование влияния коэффициента шероховатости стенок горной выработки

Горные выработки в условиях рудных месторождений проходятся буро-взрывным способом, как следствие имеют неровную поверхность. В условиях рудных месторождений ПАО «ГМК «Норильский никель», КФ АО «Апатит» и прочих на стенках имеются неровности величиной от 0 до 50 мм. Эти неровности влияют на аэродинамическое сопротивление выработок.

При численном моделировании процесса проветривания необходимо учитывать увеличение шероховатости стенок выработки. С этой целью произведено многопараметрическое моделирование процесса проветривания типовой для рудников

Талнахского рудного узла тупиковой камеры. Моделирование произведено в интервале от 0 до 600 с. При этом в очистное пространство камеры подается расчетное количество воздуха.

Временная динамика изменения концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ в зависимости от различной величины шероховатости стенок выработок приведена на рисунке 3.2.



**Рисунок 3.2 – Моделирование динамики изменения концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ при постоянной работе машины в течение 600 секунд при различных величинах шероховатости стенок выработки**

На рисунке 3.2 видно, что шероховатость выработок не приносит существенных изменений в общую динамику возрастания концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ. В связи с чем, при дальнейших расчетах используется величина шероховатости 30 мм (соответствует фактически проведенным измерениям).

### 3.3.4 Критерий Куранта-Фридрихса-Леви (исследование влияния размерности расчетной сетки и временного шага)

Критерий Куранта-Фридрихса-Леви – необходимое условие устойчивости явного численного решения некоторых дифференциальных уравнений в частных производных.

Критерий КФЛ при численном моделировании имеет вид:

$$C = \frac{|u_x|\Delta t}{\Delta x} + \frac{|u_y|\Delta t}{\Delta y} + \frac{|u_z|\Delta t}{\Delta z}, \quad (3.11)$$

где  $|u_x|$ ,  $|u_y|$ ,  $|u_z|$  – скорости переноса частицы воздуха;  $\Delta t$  – временной шаг;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – пространственный шаг (размер ячейки математической сетки).

Литература по численному моделированию ориентирует на значение критерия КФЛ менее 1.

При моделировании проветривания тупиковых камерообразных выработок на выходе из трубопровода скорость переноса частицы воздуха достигает 15 м/с, размер ячейки сетки – 0,1 м. Таким образом, для достижения рекомендуемого критерия КФЛ временной шаг должен быть менее 0,0066 с.

Однако в большей части пространства численной модели воздух движется с меньшей скоростью. Размер сетки на большей части пространства численной модели составляет 0,5 м.

### 3.3.5 Исследование влияния теплоты

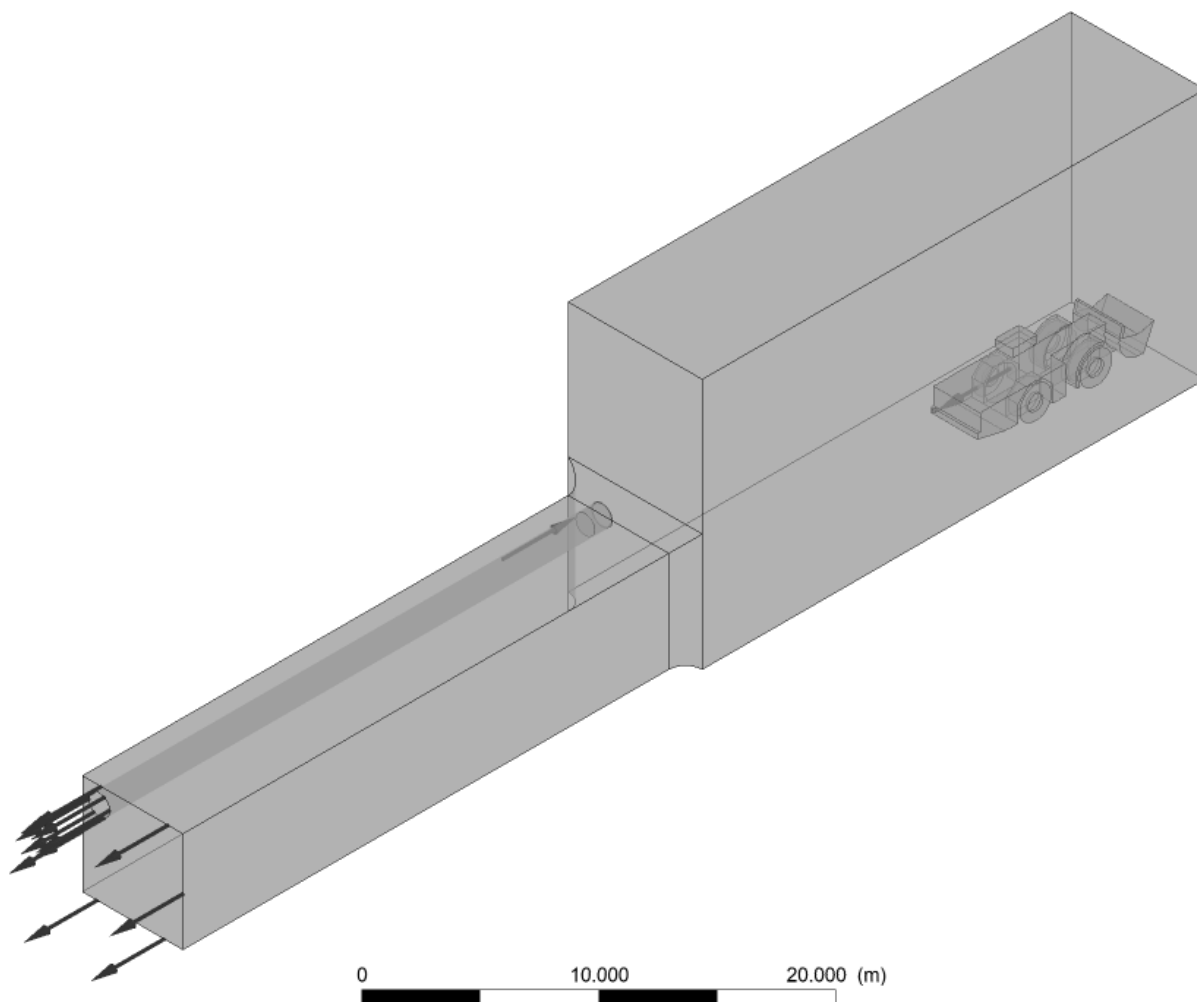
Источниками тепловыделений в камерном пространстве являются: выхлопные газы и поверхность ПДМ. ГОСТом «Оборудование горно-шахтное. Машины погрузочно-доставочные шахтные. Требования безопасности и методы испытаний» [5] регламентируется максимальная температура выхлопных газов, она составляет 70 °С. Количество выхлопных газов определяется из технической характеристики двигателя с учетом его четырехтактной работы по формуле [65]:

$$g_{\text{вых}} = k \frac{V \cdot n}{2}, \quad (3.12)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий давление избытка;  $V$  – суммарный рабочий объем цилиндров, м<sup>3</sup>;  $n$  – скорость вращения коленчатого вала, об/с.

Для моделирования процесса накопления и выноса вредных компонентов из камерного пространства, образующихся при работе машин с ДВС (СО и NO<sub>x</sub>), вследствие работы в тупиковых горных выработках ПДМ с ДВС с учетом тепловыделений техники использован метод RANS. Используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, в частности уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии.

Построена модель обобщенной очистной камеры. Геометрические параметры, использованные в модели, соответствуют геометрическим параметрам очистных тупиковых горных выработок подземных рудников Талнахского рудного узла. Для учета теплового потока с поверхности ПДМ построена реальная геометрия машины (рисунок 3.3).



**Рисунок 3.3 – Расчетная область**

На входе в расчетную область задаются массовые расходы воздуха и концентрации газа. На выходе задается нулевое статическое давление. На стенках задается прилипание потока с учетом шероховатости стенки. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок, равной 30 мм.

Для задания равномерного по площади тепловыделения поверхности ПДМ использованы результаты тепловизионной и температурной съемки в шахтных условиях, описанные в работе [9]. В работе приращение температуры воздуха составило 6,5 °С при работе ПДМ AtlasCopco ST-1030 (рисунок 3.4), что соответствует выделению 177 кВт теплоты:



$$W_{\text{ДВС}} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (3.13)$$

где  $c$  – теплоемкость обдувающего машину воздуха, кДж/кг;  $\rho$  – плотность обдувающего машину воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход воздуха в выработке с горной машиной, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  – прирост температуры воздуха из-за работы машины, °С.

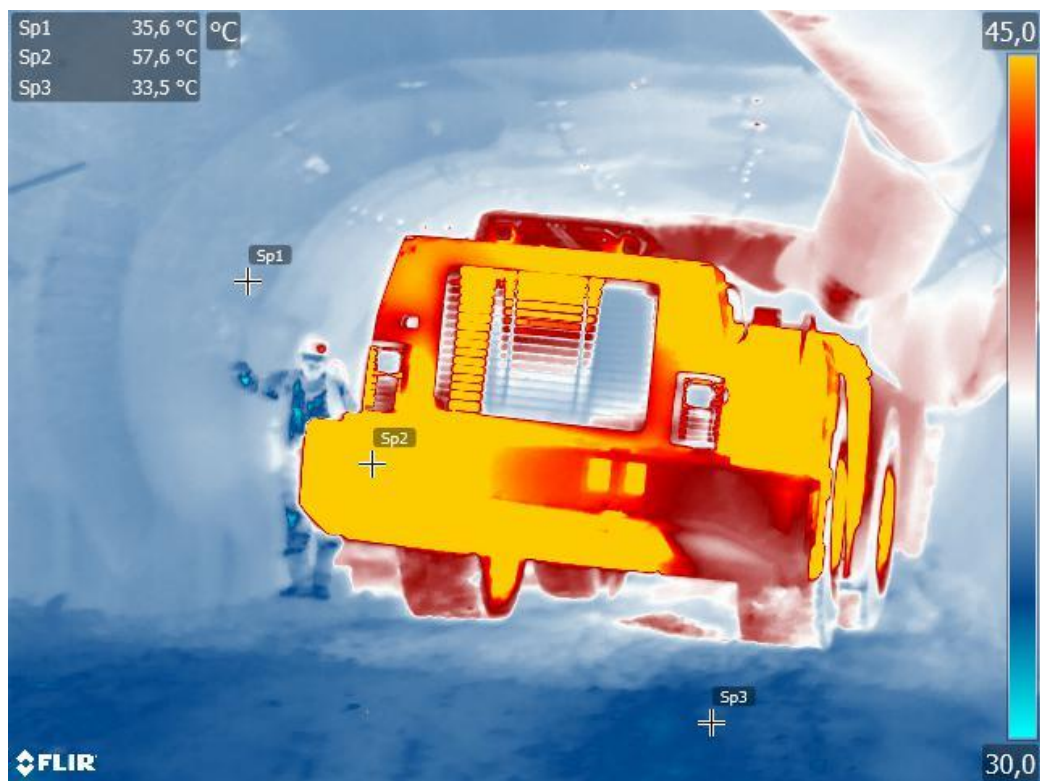


Рисунок 3.4 – Термоснимок работающей ПДМ AtlasCorpo ST-1030

По результатам моделирования построены поля распределения температуры в поперечном сечении исследуемой области (рисунок 3.5).

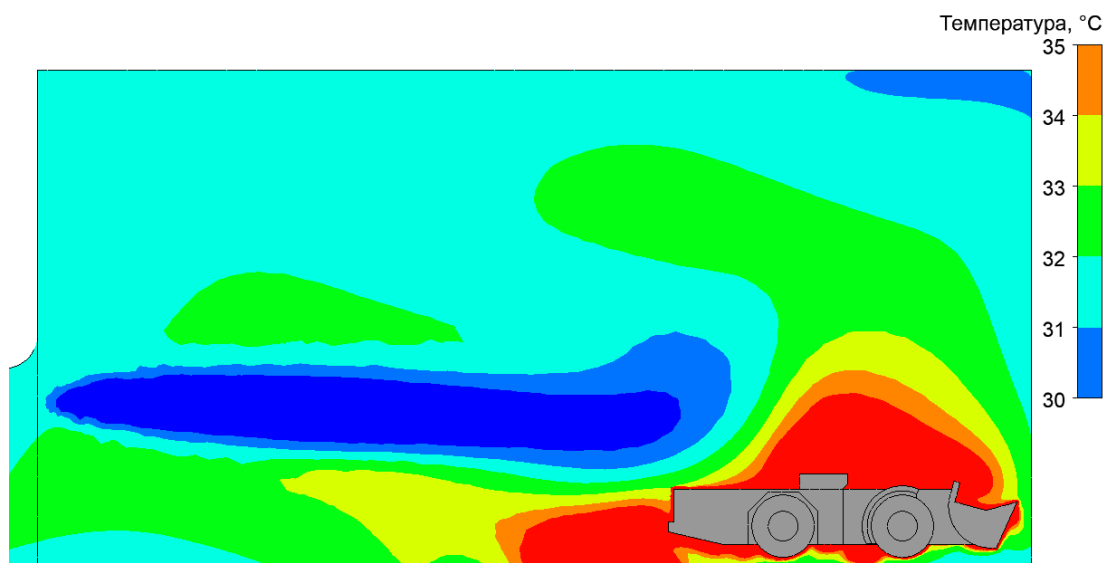
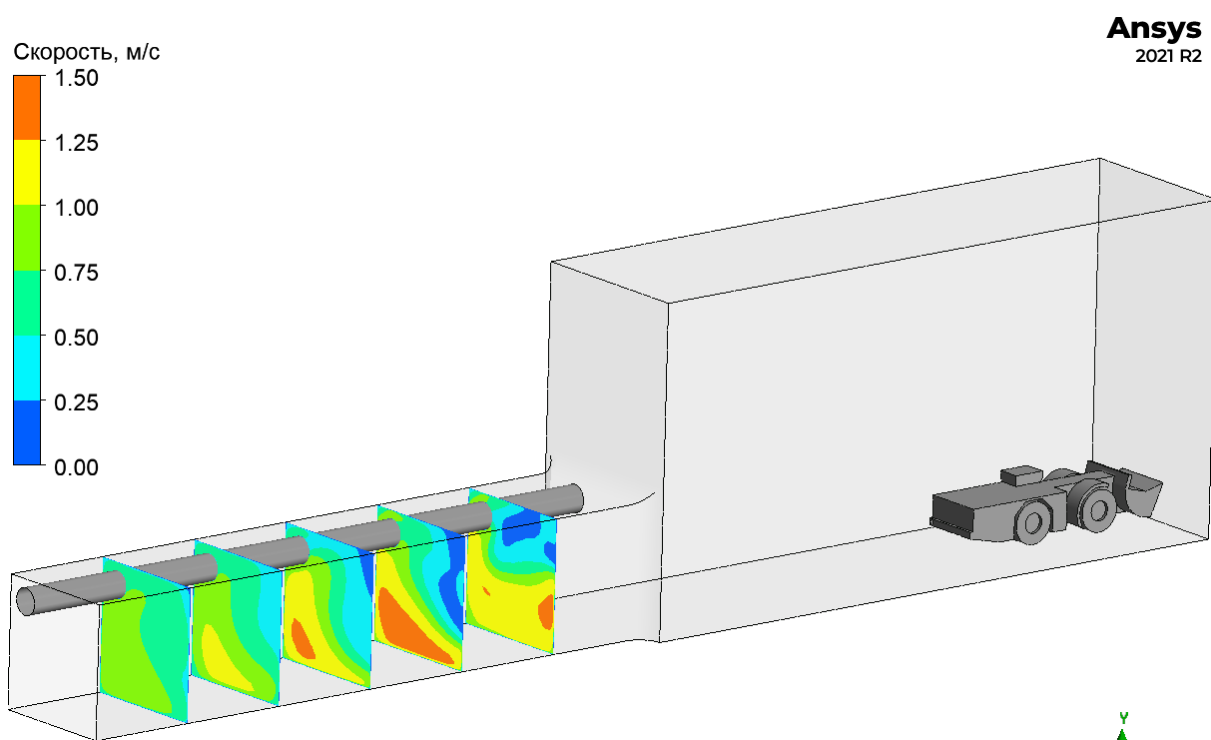


Рисунок 3.5 – Распределения температур в срединном вертикальном срезе

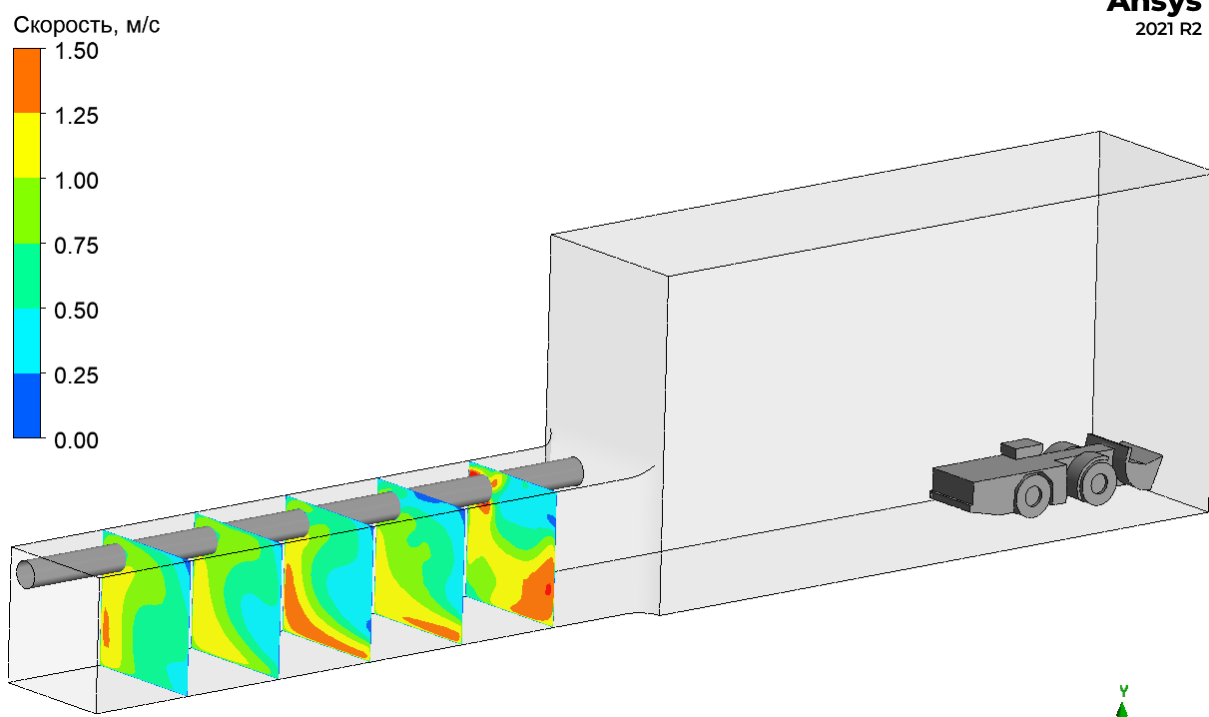
Температура в очистном пространстве составляет от 30 до 35 градусов (рисунок 3.5). В очистном пространстве отсутствует вертикальное расслоение. Таким образом, вынужденная конвекция, создаваемая потоком воздуха, выходящим из трубопровода, преобладает над естественной тепловой конвекцией.

Произведена оценка влияния тепловыделений в очистном пространстве на поля распределения скоростей воздуха в нарезной выработке, в которой расположено рабочее место машиниста ПДМ, управляющего техникой с помощью пульта дистанционного управления. На рисунках 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 представлены результаты моделирования четырех вариантов задания тепловыделений техники в пределах очистной камеры:

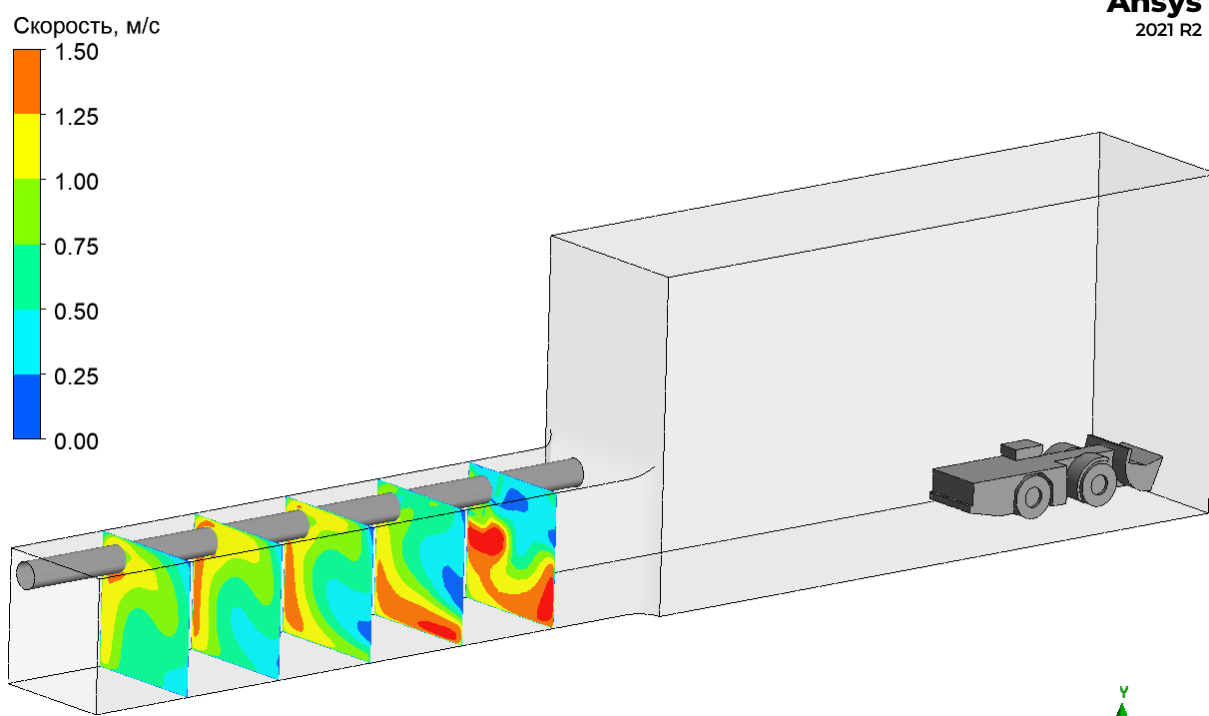
1. Без учета тепловыделений;
2. С учетом температуры выхлопных газов;
3. С учетом температуры выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной тепловым потоком;
4. С учетом выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной статической температурой.



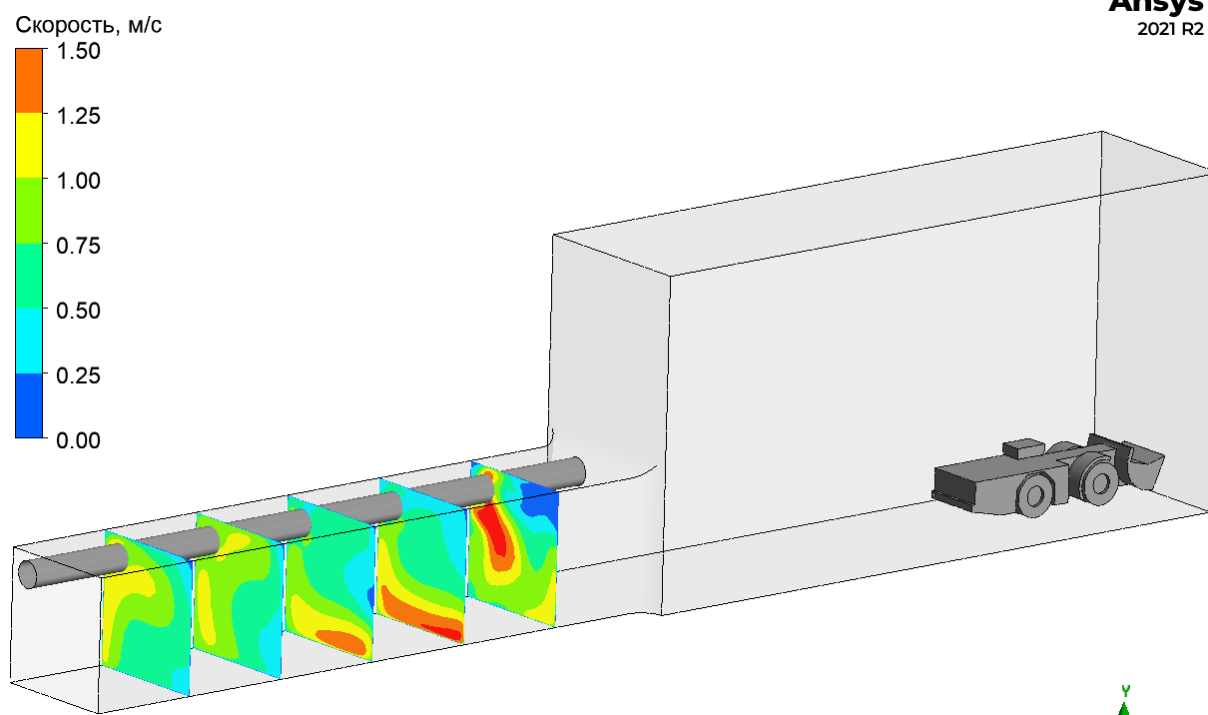
**Рисунок 3.6 – Поля скоростей движения воздуха (без учета тепловыделений)**



**Рисунок 3.7 – Поля скоростей движения воздуха (С учетом температуры выхлопных газов)**



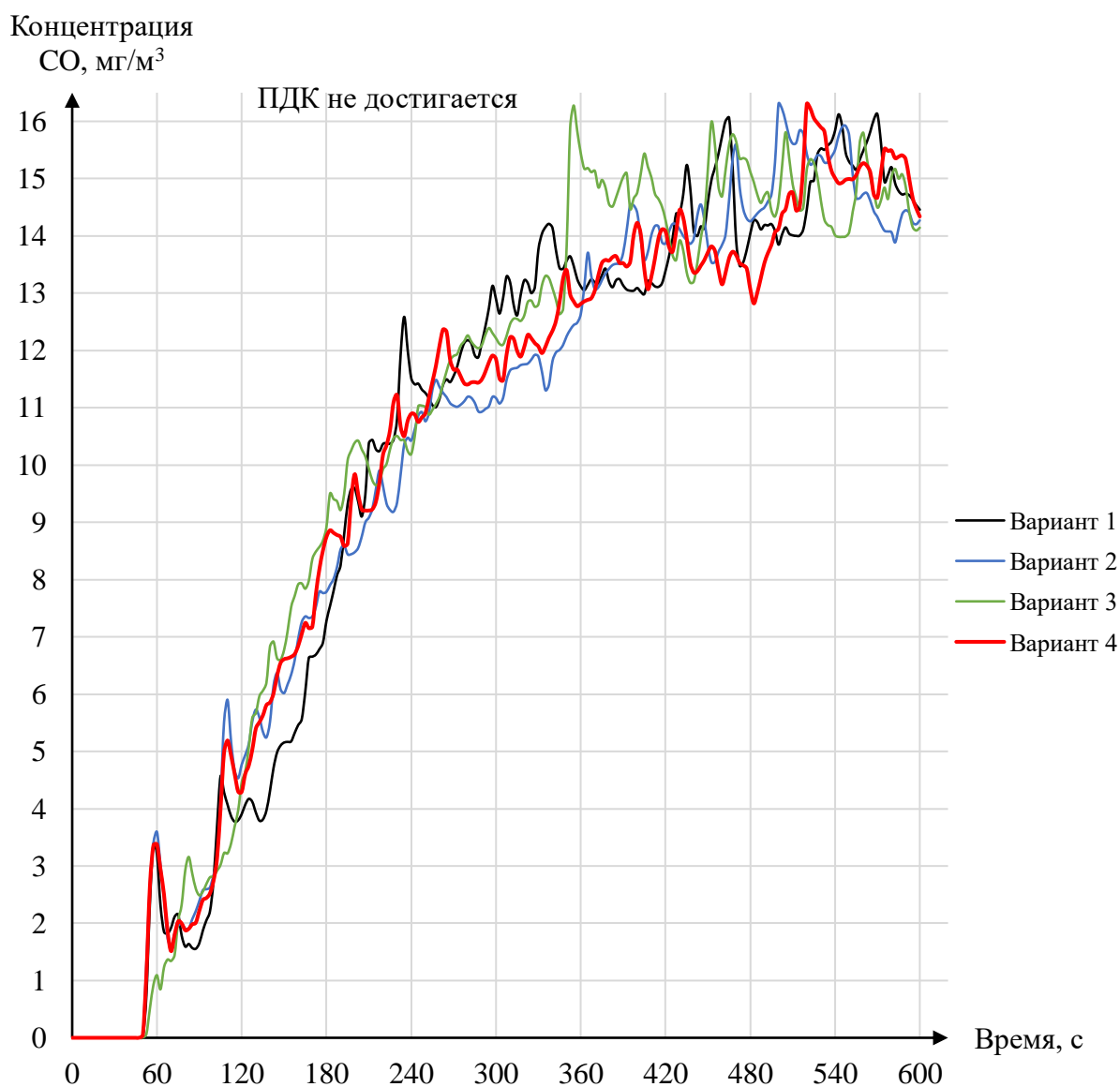
**Рисунок 3.8 – Поля скоростей движения воздуха (С учетом температуры выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной тепловым потоком)**



**Рисунок 3.9 – Поля скоростей движения воздуха (С учетом температуры выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной статической температурой)**

Способ задания тепловыделений в пределах очистного пространства существенно влияет на распределение скоростей воздуха в нарезной выработке (рисунки 3.6, 3.7, 3.8, 3.9). Различия в количестве привносимой в атмосферу выработки теплоты и местах ее образования обуславливают формирование различных конвективных вихревых структур в очистной и нарезной выработках. С учетом полученного результата интересно исследовать как меняется концентрация вредных примесей в нарезной выработке в зависимости от способа задания тепловыделений.

Для задачи проветривания очистного пространства и нарезной выработки при отгрузке руды наиболее важным является параметр концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ. На графике (рисунок 3.10) представлены результаты непрерывной работы ПДМ в очистном пространстве в течение 600 секунд. Как видно из графика при всех рассмотренных вариантах моделирования асимптота графиков одинакова, присутствует несущественная разница во временных колебаниях концентрации, однако она исчезает после усреднения по времени.



**Рисунок 3.10 – График возрастания концентрации СО на рабочем месте машиниста ПДМ при различных вариантах задания тепловыделений техники в пределах очистной камеры**

Характер возрастания кривых также аналогичен, что свидетельствует о том, что при учете теплового расширения выхлопных газов тепловыделениями в пределах очистного пространства для решения задачи эффективности проветривания тупиковых очистных камер можно пренебречь [50].

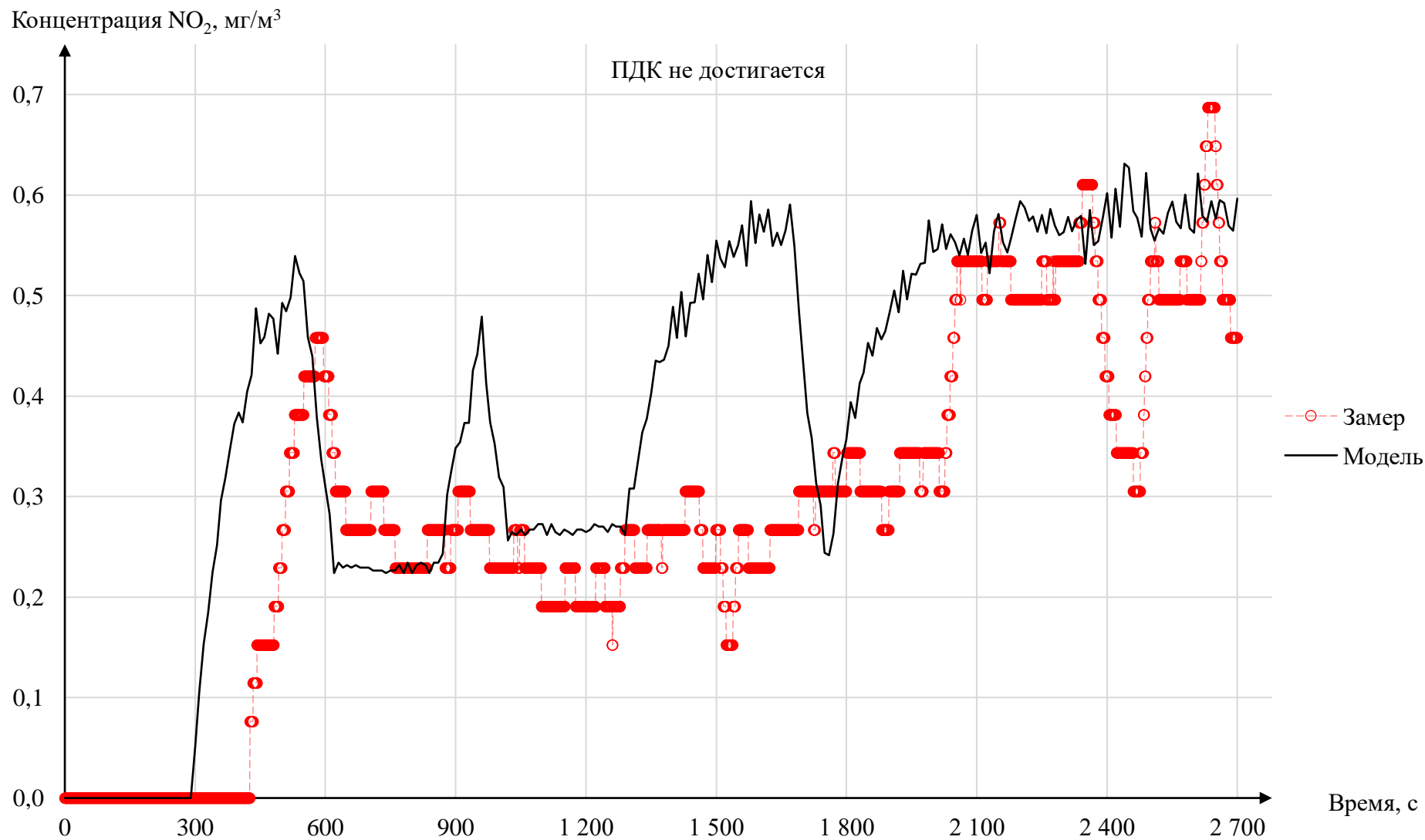
### **3.4 Валидация численной модели на основании натуральных исследований**

С целью валидации выбранных параметров численной модели произведено моделирование процесса проветривания горных выработок при работе в них техники с ДВС. Моделирование проведено для выработок, в которых были произведены натурные измерения, описанные в разделе 2.2. Валидация произведена сопоставлением

измеренных в ходе натуральных исследований концентраций CO, NO и NO<sub>2</sub> с полученными в ходе моделирования.

#### **3.4.1 Валидация численной модели очистной камеры 1-1-1 рудника «Комсомольский»**

Для валидации численной модели проветривания тупиковой очистной камеры произведено сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций NO<sub>2</sub>, NO и CO с полученными в ходе моделирования. На рисунках 3.11, 3.12, 3.13 произведено сравнение натуральных данных (указаны красными точками) с данными моделирования (указаны черной линией).



**Рисунок 3.11 – Сопоставление результатов определения концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**

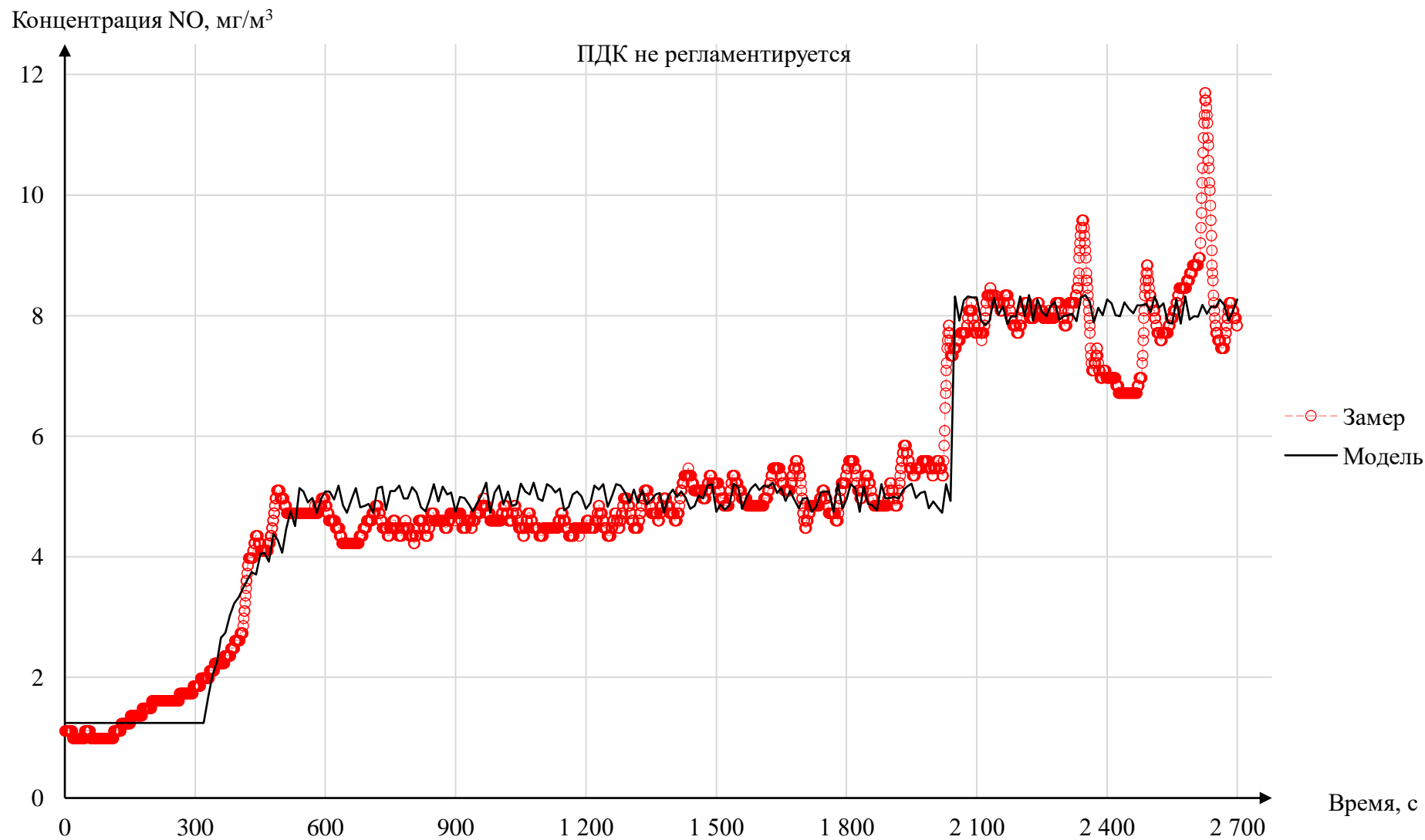
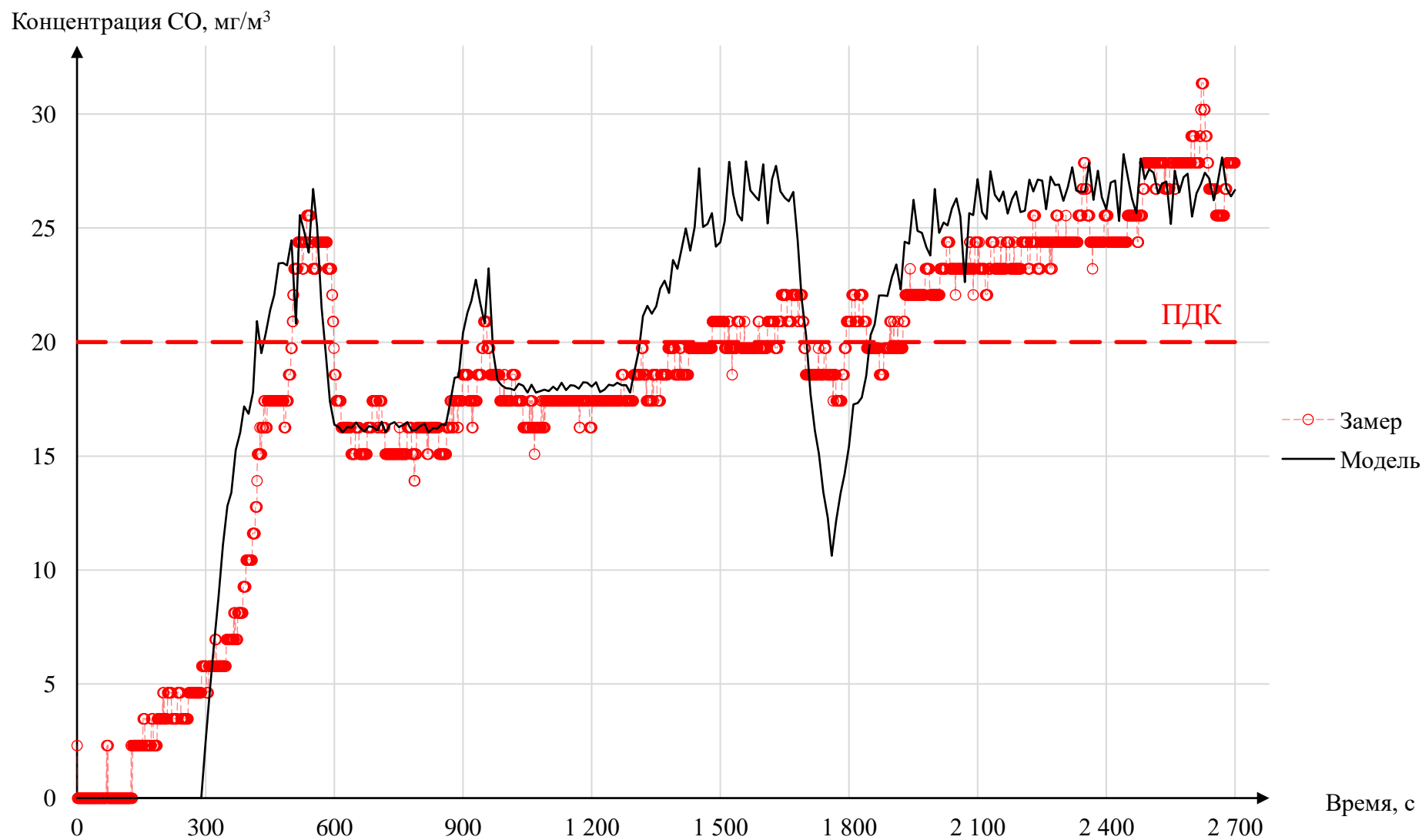


Рисунок 3.12 – Сопоставление результатов определения концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию





**Рисунок 3.13 – Сопоставление результатов определения концентрации СО на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**

Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования произведено сравнением площадей под кривыми (определенных интегралов), представленными в таблице 3.1.

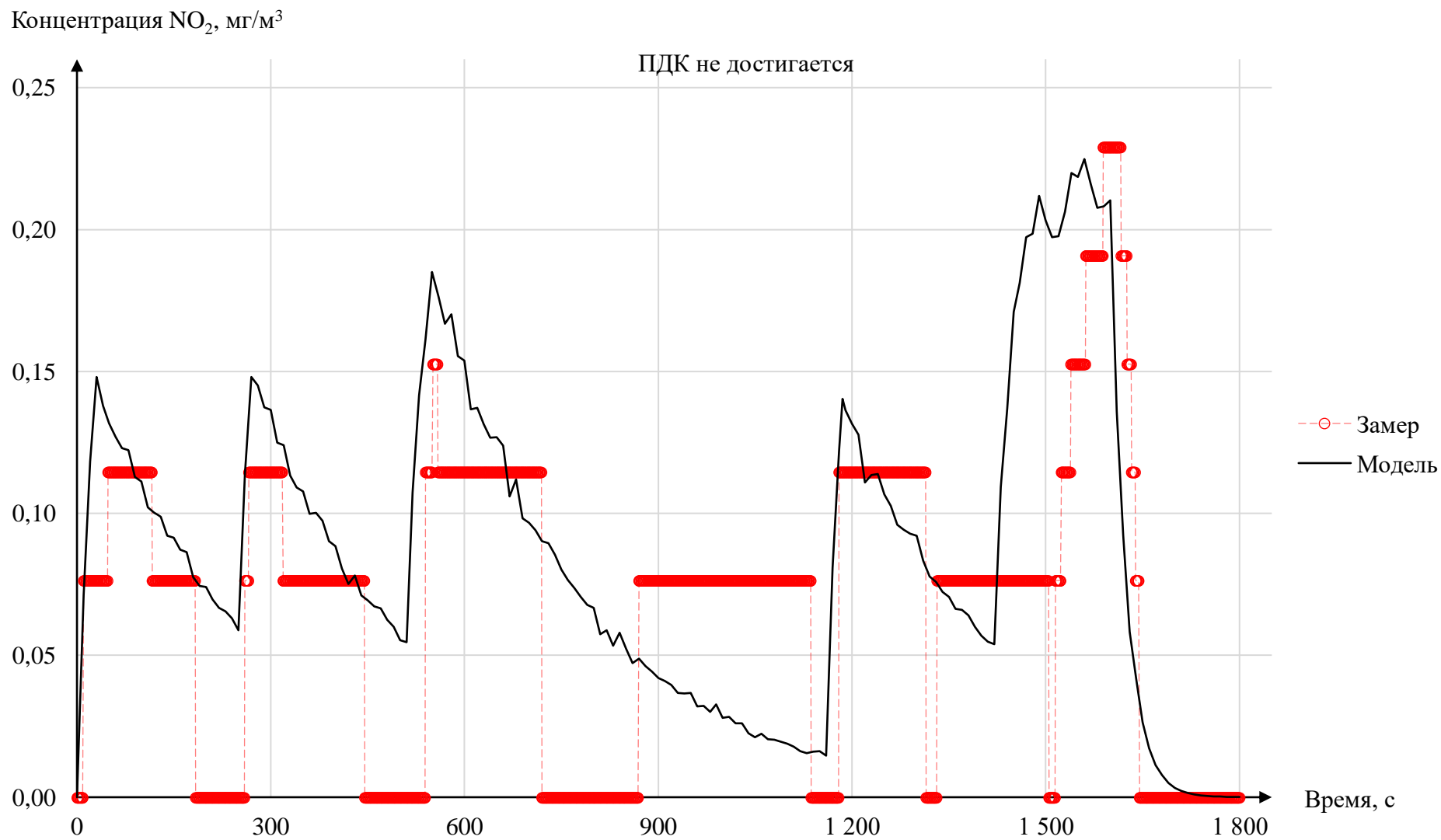
Таблица 3.1 – Сравнение площадей под кривыми (определенных интегралов)

| <b>Газ</b>      | <b>Натурные измерения</b> | <b>Данные моделирования</b> | <b>Процент отклонения</b> |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| NO <sub>2</sub> | 536,7                     | 483,3                       | 10%                       |
| NO              | 11232,6                   | 11063,3                     | 2%                        |
| CO              | 44607,4                   | 42010,0                     | 6%                        |

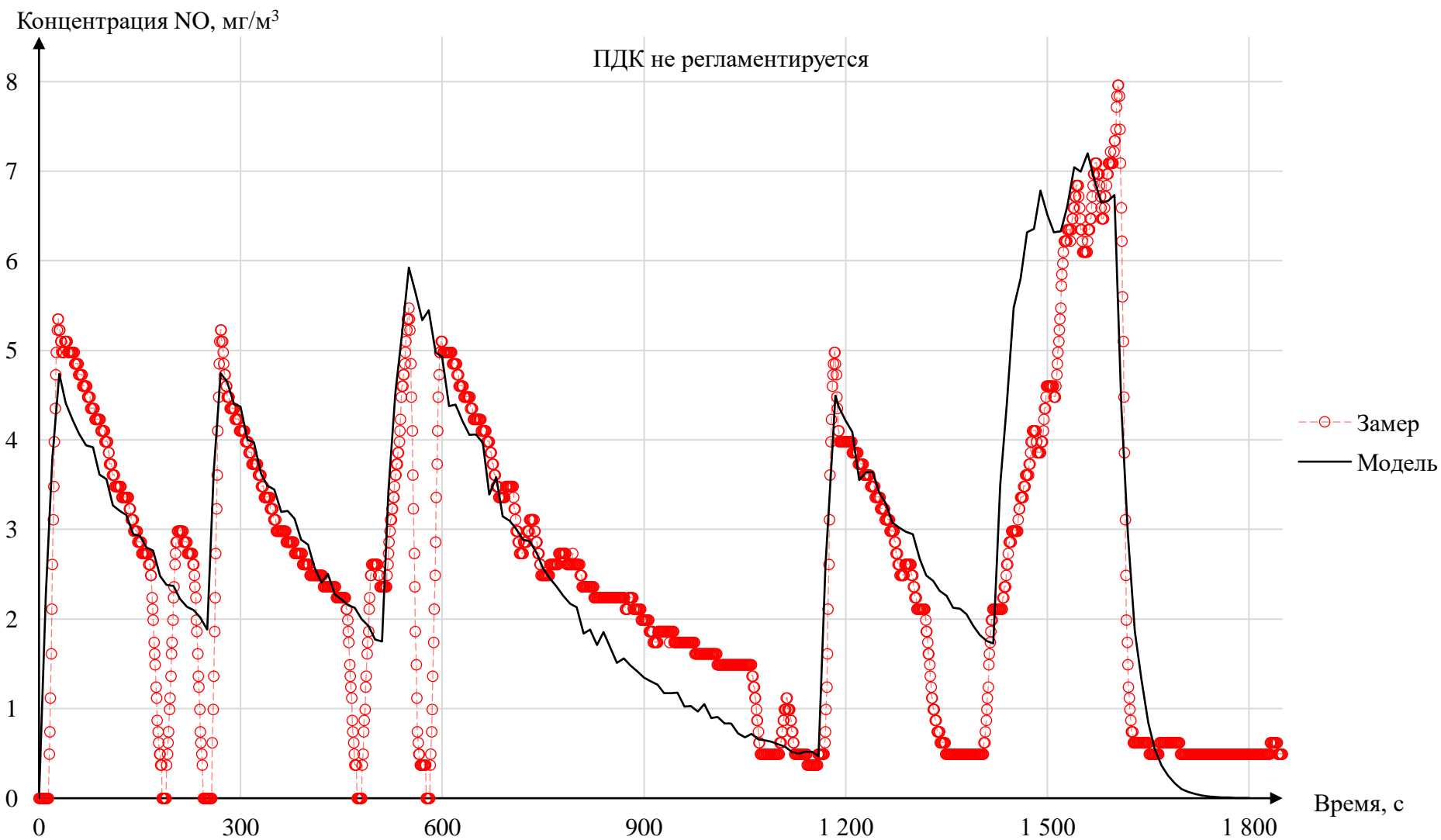
При сопоставлении измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования сделан вывод о соответствии разработанной модели проветривания фактическому газораспределению в пределах разрезного штрека.

#### **3.4.2 Валидация численной модели очистной камеры 11\_7-2 рудника «Октябрьский»**

Для валидации численной модели проветривания тупиковой очистной камеры произведено сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций NO<sub>2</sub>, NO и CO с полученными в ходе моделирования. На рисунках 3.14, 3.15, 3.16 произведено сравнение натуральных данных (указаны красными точками) с данными моделирования (указаны черной линией).



**Рисунок 3.14 – Сопоставление результатов определения концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**



**Рисунок 3.15 – Сопоставление результатов определения концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**

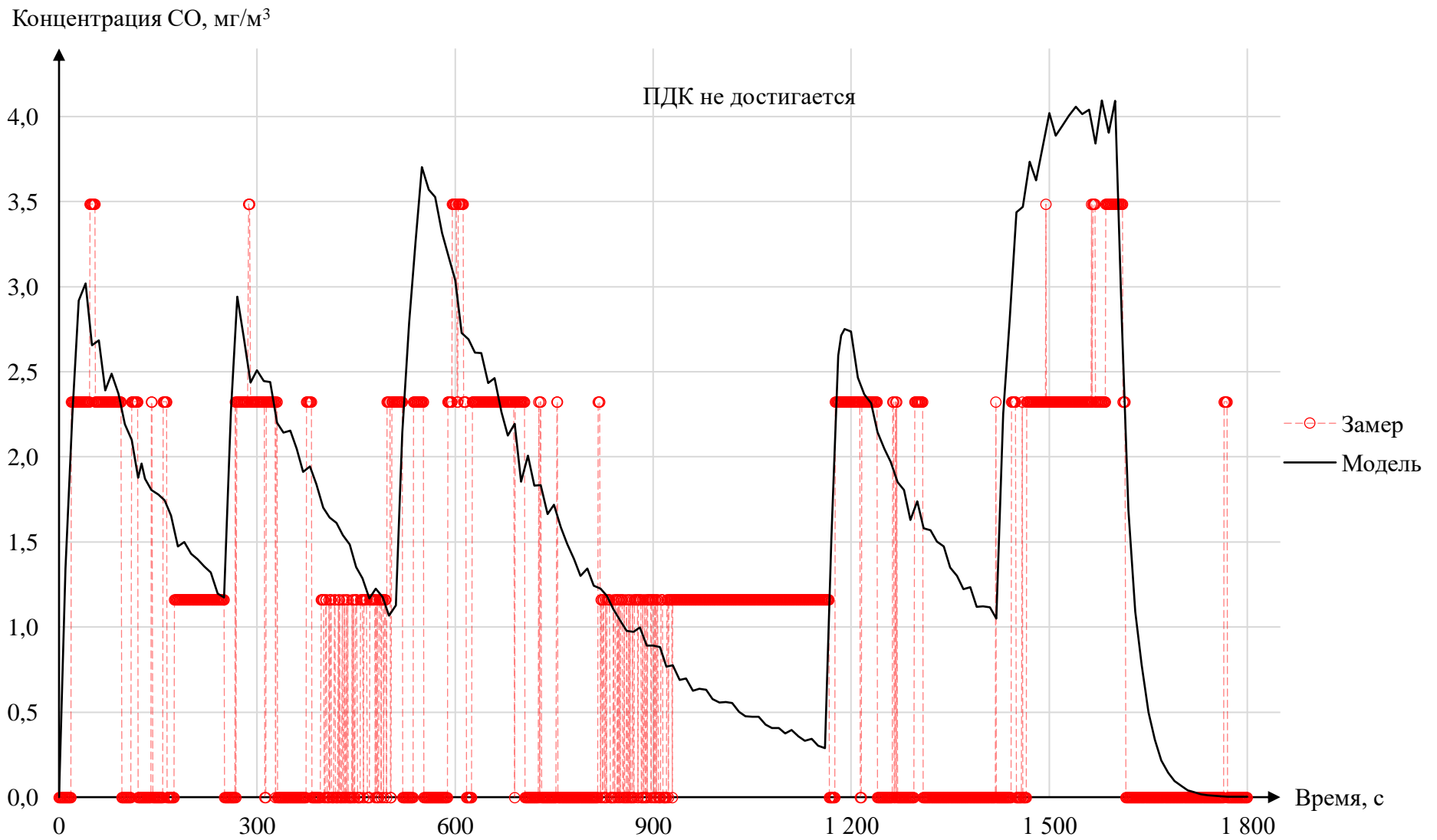


Рисунок 3.16 – Сопоставление результатов определения концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию

Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования произведено сравнением площадей под кривыми (определенных интегралов), представленными в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение площадей под кривыми (определенных интегралов)

| Газ             | Натурные измерения | Данные моделирования | Процент отклонения |
|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| CO              | 2620,06            | 2488,00              | 5%                 |
| NO              | 4042,38            | 3698,50              | 9%                 |
| NO <sub>2</sub> | 82,34              | 74,72                | 9%                 |

При сопоставлении измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования сделан вывод о соответствии разработанной модели проветривания фактическому газораспределению в пределах разрезного штрека.

### 3.4.3 Валидация численной модели очистной камеры КАМ-11-15-НА\_3 рудника «Маяк»

Для валидации численной модели проветривания тупиковой очистной камеры произведено сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций NO<sub>2</sub>, NO и CO с полученными в ходе моделирования. На рисунках 3.17, 3.18, 3.19 произведено сравнение натуральных данных (указаны красными точками) с данными моделирования (указаны черной линией).

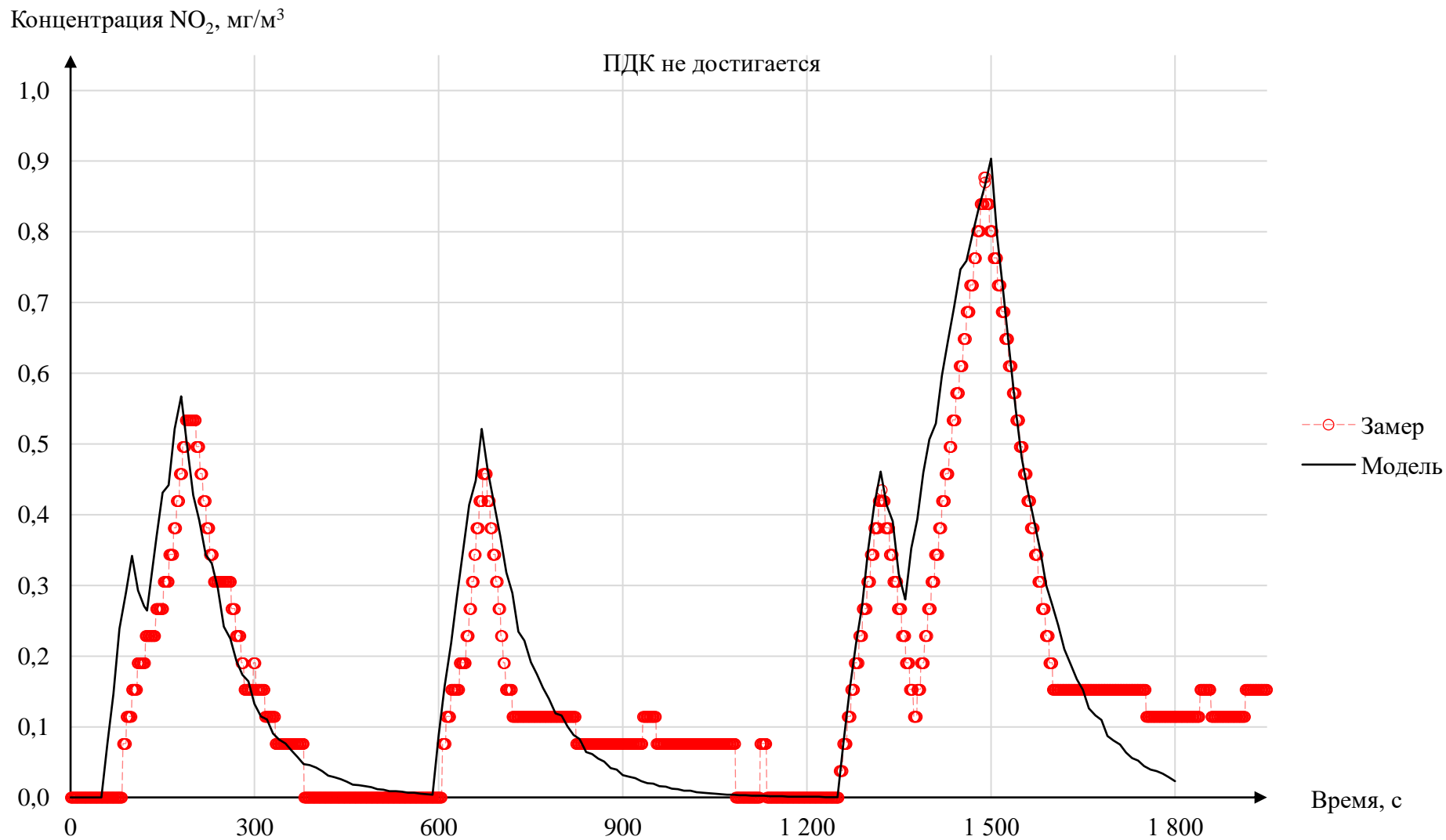
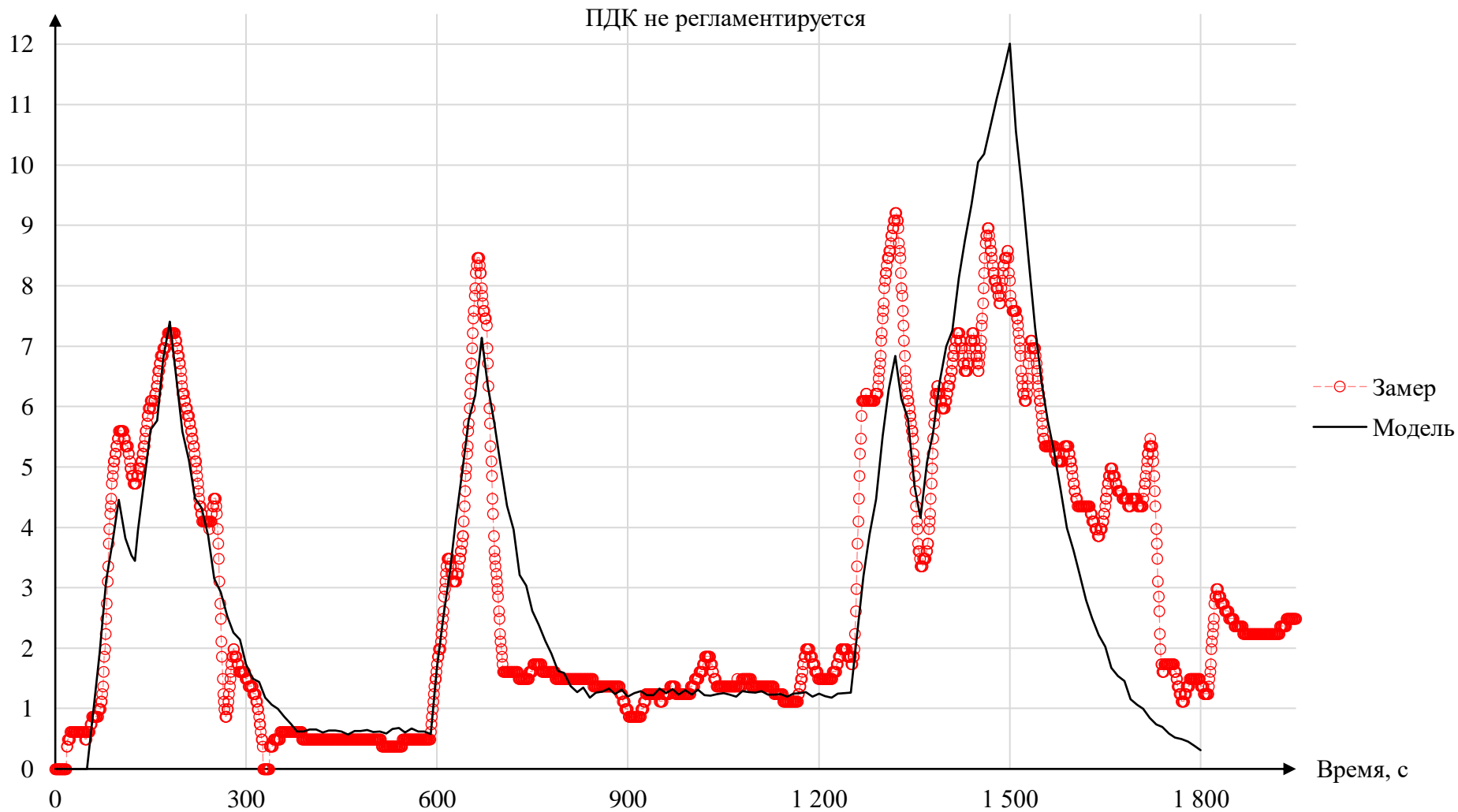


Рисунок 3.17 – Сопоставление результатов определения концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>



**Рисунок 3.18 – Сопоставление результатов определения концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**



Концентрация CO, мг/м<sup>3</sup>

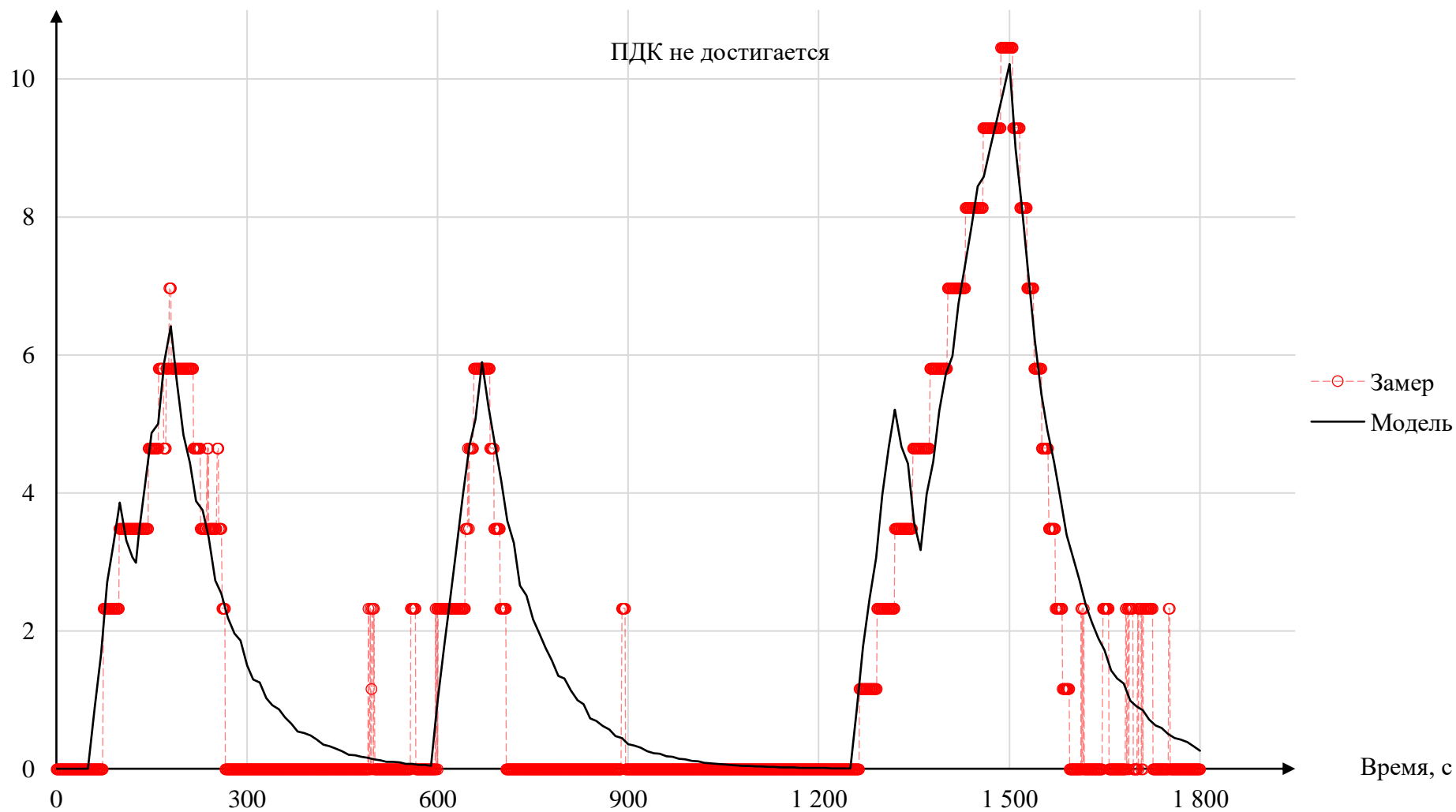


Рисунок 3.19 – Сопоставление результатов определения концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию

Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования произведено сравнением площадей под кривыми (определенных интегралов), представленными в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сравнение площадей под кривыми (определенных интегралов)

| Газ             | Натурные измерения | Данные моделирования | Процент отклонения |
|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| NO <sub>2</sub> | 214,3              | 217,4                | -1 %               |
| NO              | 6670,4             | 6387,6               | 4 %                |
| CO              | 10444,6            | 9645,4               | 8 %                |

При сопоставлении измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования сделан вывод о соответствии разработанной модели проветривания фактическому газораспределению в пределах разрезного штрека.

#### **3.4.4 Валидация численной модели очистной камеры 3-17-1 рудника «Скалистый»**

Для валидации численной модели проветривания тупиковой очистной камеры произведено сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций NO<sub>2</sub>, NO и CO с полученными в ходе моделирования. На рисунках 3.20, 3.21, 3.22 произведено сравнение натуральных данных (указаны красными точками) с данными моделирования (указаны черной линией).

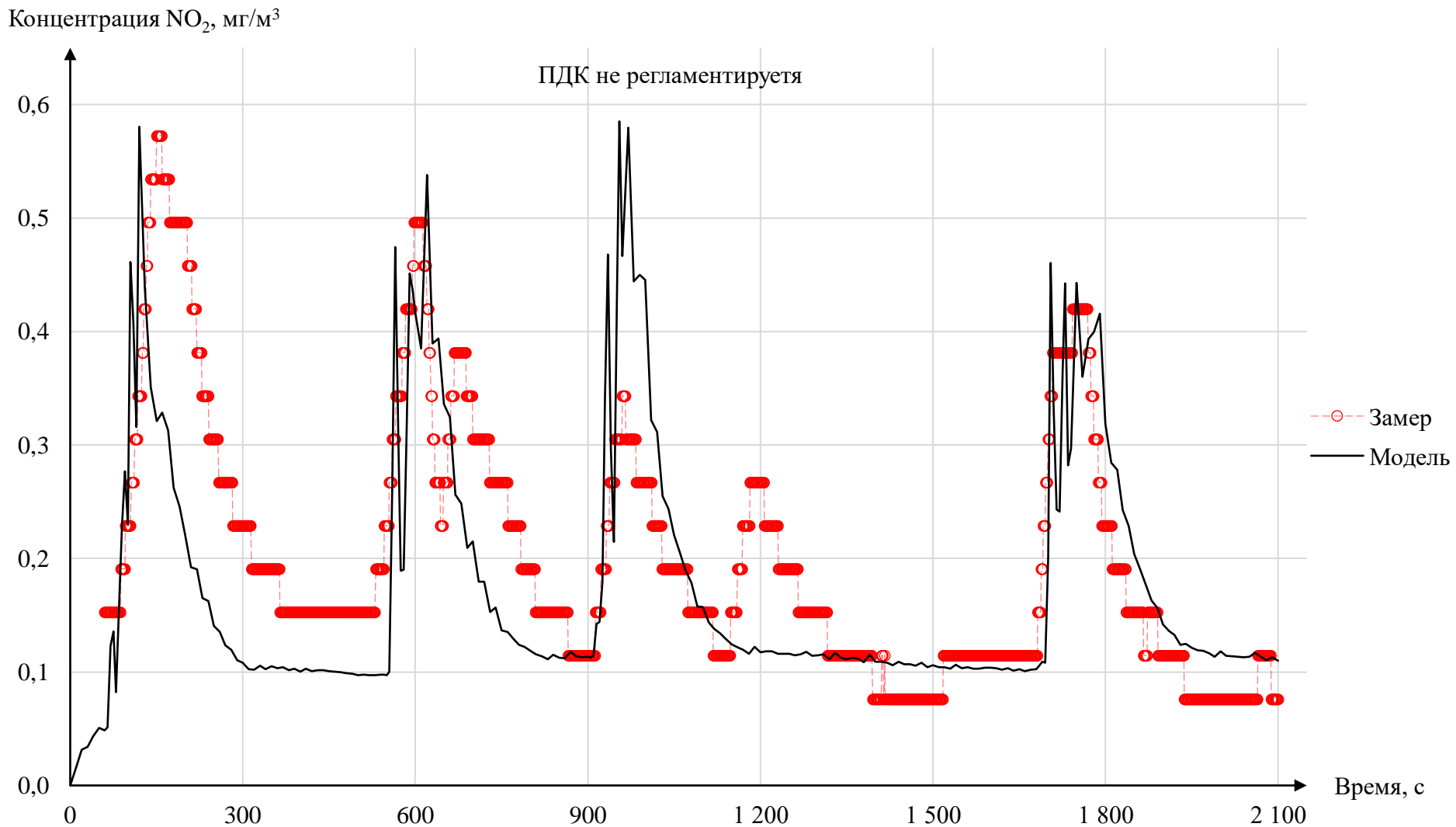


Рисунок 3.20 – Сопоставление результатов определения концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

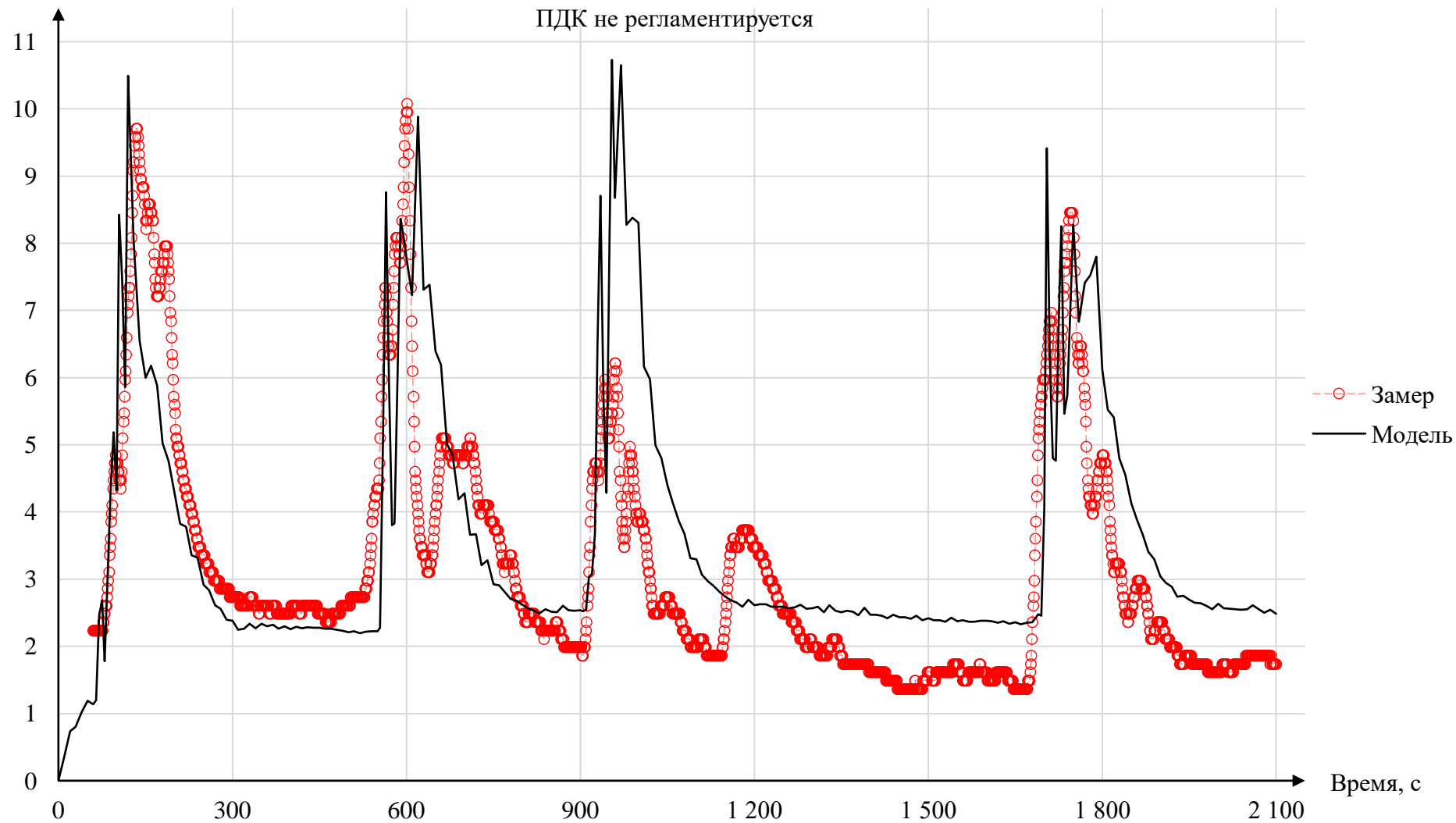
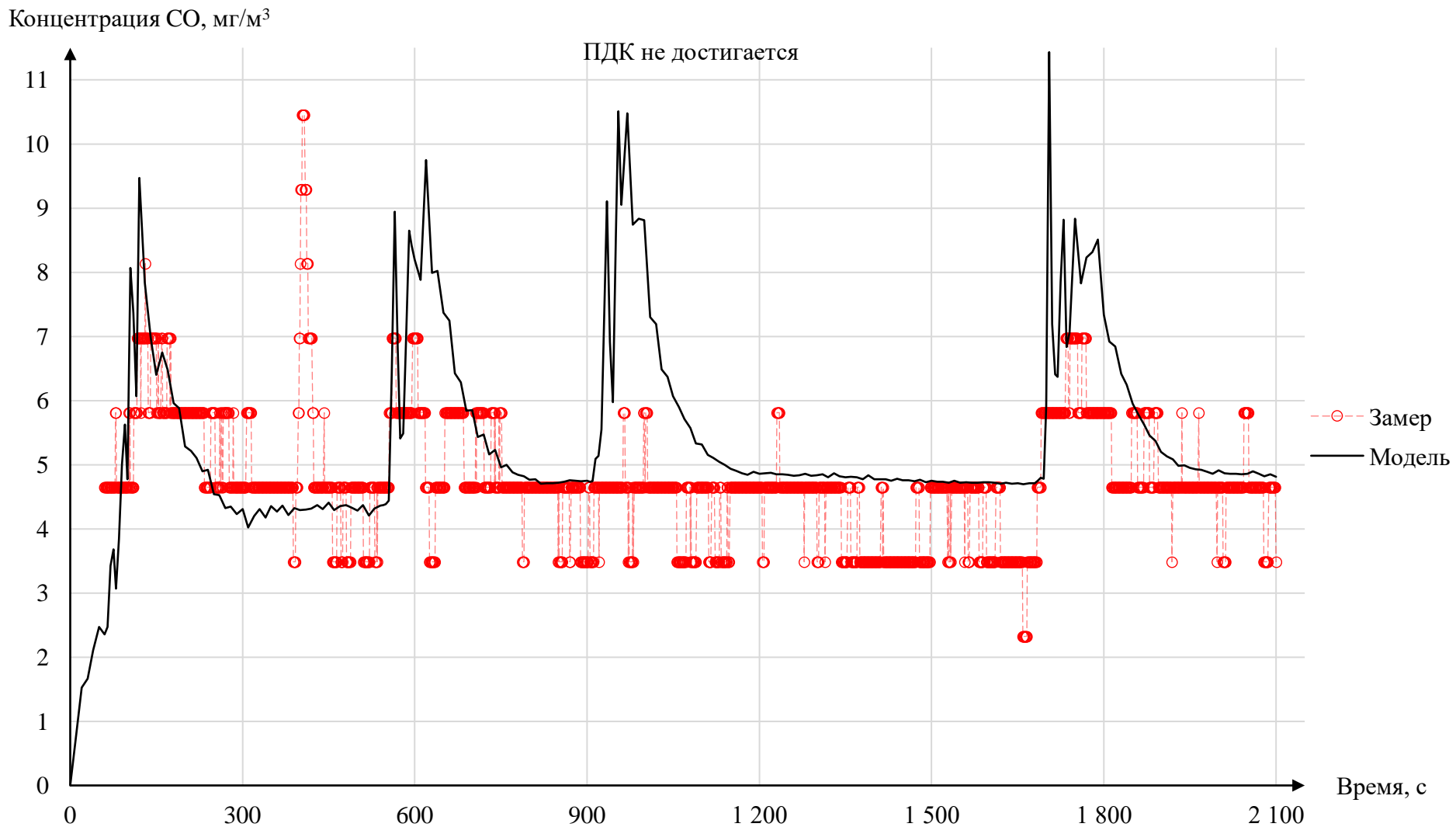


Рисунок 3.21 – Сопоставление результатов определения концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию



**Рисунок 3.22 – Сопоставление результатов определения концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ по натурным измерениям и математическому моделированию**

Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования произведено сравнением площадей под кривыми (определенных интегралов), представленными в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Сравнение площадей под кривыми (определенных интегралов)

| <b>Газ</b>      | <b>Натурные измерения</b> | <b>Данные моделирования</b> | <b>Процент отклонения</b> |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| NO <sub>2</sub> | 214,3                     | 217,4                       | -1 %                      |
| NO              | 6670,4                    | 6387,6                      | 4 %                       |
| CO              | 10444,6                   | 9645,4                      | 8 %                       |

При сопоставлении измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования сделан вывод о соответствии разработанной модели проветривания фактическому газораспределению в пределах разрезного штрека.

### 3.5 Выводы по главе

Глава посвящена разработке, параметризации и валидации численной трехмерной модели процесса проветривания тупиковых очистных камер большого сечения. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- При моделировании течения газовой среды в пространстве тупиковой очистной камеры большого сечения и примыкающей к ней нарезной выработки применение стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности дает адекватные результаты. Интенсивность турбулентности на входе в расчетную область составляет при этом 2%, масштаб вихрей – 20 см.
- Для учета аэродинамического сопротивления трения на поверхностях численной модели, соответствующих стенкам выработок, задается прилипание потока с учетом шероховатости. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок, значение высоты выступа шероховатости составляет 30 мм.
- При разработке численной трехмерной модели процесса проветривания тупиковых очистных камер большого сечения особое внимание следует уделять исследованию сеточной сходимости и выбору временного шага. В настоящей работе сходимость по расчетной сетке была достигнута при среднем пространственном шаге 0,5 м и временном шаге 0,5 с.
- Для решения задач эффективности проветривания тупиковых очистных камер большого сечения тепловыделениями техники в пределах очистного пространства можно пренебречь при учете теплового расширения выхлопных газов.
- Параметризованная численная модель валидирована на основании натуральных исследований, описание которых приведено во второй главе работы. Сопоставление измеренных в ходе натуральных исследований концентраций вредных компонентов выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с полученными в ходе моделирования произведено сравнением определенных интегралов, максимальный процент отклонения составил 10%.

Разработанная и параметризованная модель процесса проветривания тупиковых очистных выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы позволяет перейти к многопараметрическому моделированию с целью выявления факторов влияния на процесс проветривания выноса газов из очистного пространства.

#### **4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОВЕТРИВАНИЕ ОЧИСТНОЙ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ – КАМЕРЫ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ**

Для достижения наилучших результатов моделирование производится в два этапа: сначала стационарный расчет первоначального воздухораспределения, после этого нестационарный расчет динамики воздуха и газов. Стационарный расчет используется для первого приближения начальных условий воздухораспределения в численной модели с целью сокращения времени достижения указанной точности на первых итерациях нестационарного расчета. Условием сходимости расчета является достижение указанной точности  $1 \cdot 10^{-4}$  среднеквадратичных невязок давления и компонент скорости.

##### **4.1 Исследование влияния геометрических параметров очистной тупиковой камерообразной горной выработки на процесс выноса из очистного пространства вредных веществ выхлопных газов самоходного горно-шахтного оборудования с двигателем внутреннего сгорания**

Геометрическими параметрами тупиковой очистной камеры большого сечения являются: ширина и высота камерного пространства; длина камерного пространства, а также величина развала руды, запирающего камерное пространство вследствие ведения взрывных работ.

##### **4.1.1 Конфигурация поперечного сечения**

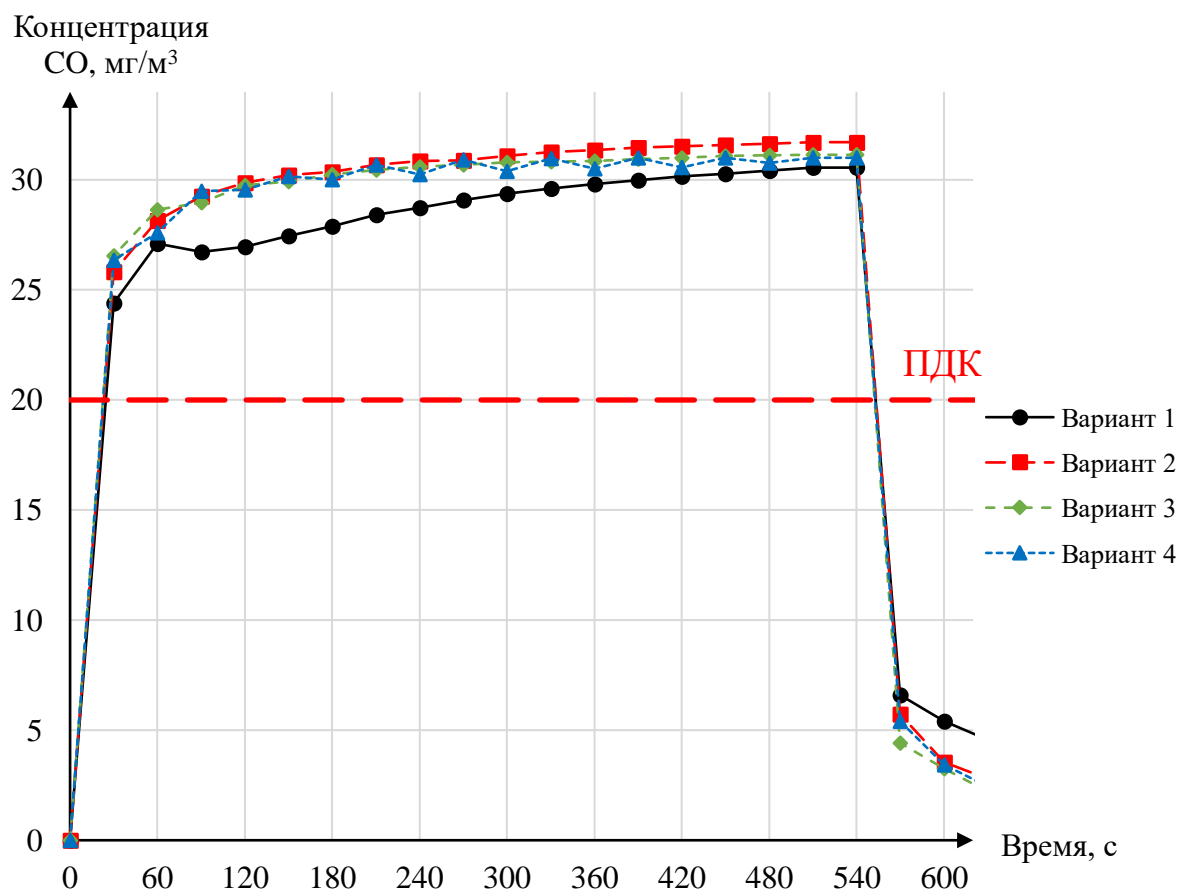
Геометрические параметры очистной камеры в зависимости от конфигурации поперечного сечения, использованные при моделировании процесса проветривания, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры расчета для вариантов

| <b>№ варианта</b> | <b>Ширина камеры, м</b> | <b>Высота камеры, м</b> |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                 | 6                       | 20                      |
| 2                 | 8                       | 15                      |
| 3                 | 9                       | 13,33                   |
| 4                 | 10                      | 12                      |

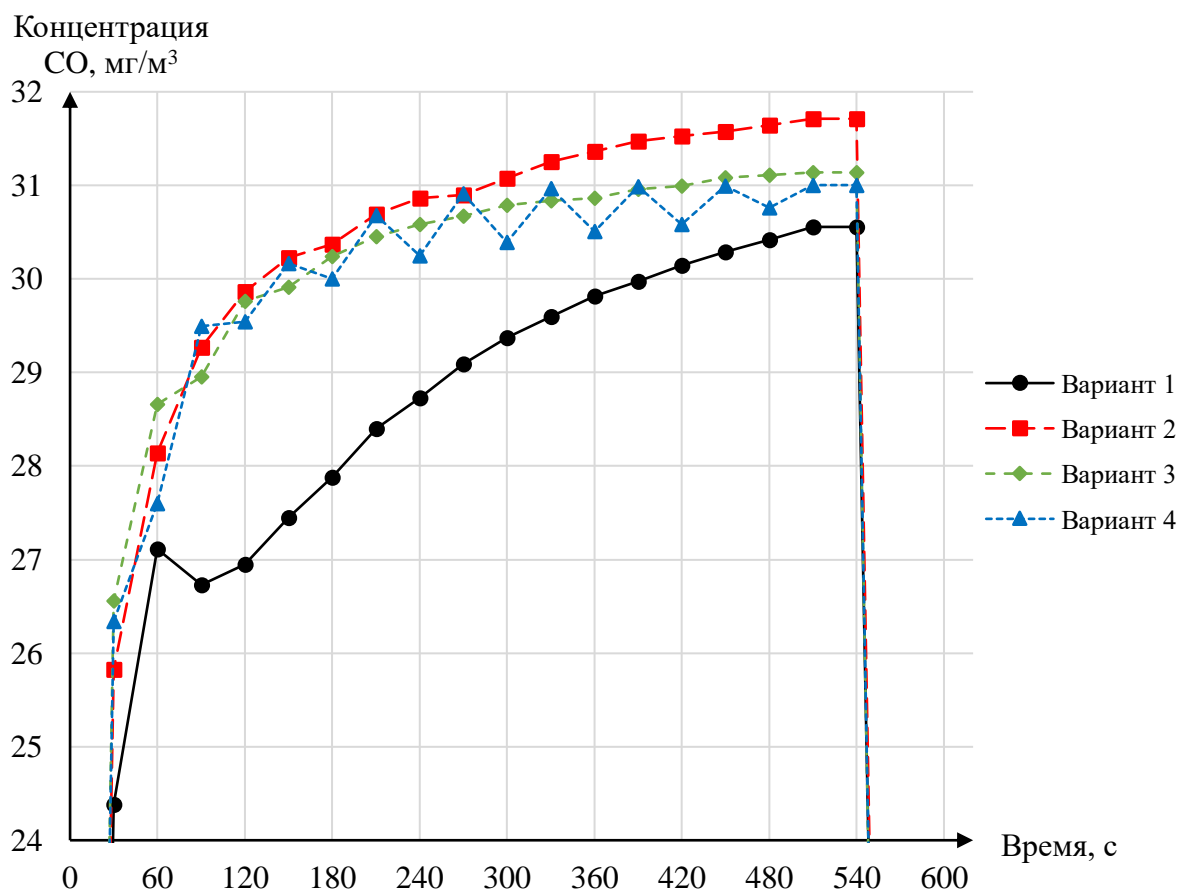
Результаты моделирования проветривания тупиковой очистной камеры и прилегающей к ней разрезной выработки приведены в графическом виде. Зависимости изменения концентрации СО в сечении рабочей зоны машиниста ПДМ от цикла работы ПДМ в пространстве очистной камеры представлены на рисунке 4.1.





**Рисунок 4.1 – Зависимости возрастания концентрации СО в сечении рабочей зоны машиниста ПДМ от времени нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры при различных конфигурациях поперечного сечения очистной камеры**

На рисунке 4.1 виден схожий характер резкого возрастания концентрации ядовитых примесей в сечении рабочего места машиниста ПДМ на первых 30 секундах нахождения ПДМ в пространстве камеры. На рисунке 4.2 представлены зависимости изменения концентрации СО в сечении рабочего места машиниста ПДМ от времени нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры в диапазоне концентраций СО равном 24÷32 мг/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 4.2 – Фрагмент зависимостей возрастания концентрации СО в сечении рабочей зоны машиниста ПДМ от времени нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры при различных конфигурациях поперечного сечения очистной камеры в диапазоне концентраций ядовитых примесей равном 24÷32 мг/м<sup>3</sup>**

Из рисунке 4.2 виден схожий характер возрастания концентрации ядовитых примесей в срезе времени 30-540 секунд кривых, соответствующих вариантам №№ 2-4, максимальное отклонение от наибольшего значения концентрации ядовитых примесей (красная линия, соответствующая варианту 2) составляет 3 %.

Черная линия, соответствующая варианту 1, отклоняется от остальных, что объясняется наибольшей высотой камеры (20 м). На начальном этапе проветривания воздушный поток является не установившимся и концентрируется в зоне вблизи устья камеры. Однако затем постепенно выполаживается с соизмеримой асимптотой остальных линий, соответствующих вариантам №№ 2-4, отклонение в интервалах времени 420÷540 с составляет 4 %.

Отклонение значений концентрации ядовитых примесей во всем интервале времени при всех конфигурациях геометрии сечения камерообразной выработки от наибольшего значения концентрации ядовитых примесей (вариант 2) представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Отклонение значений концентрации СО от наибольшего значения

| <b>Время, с</b> | <b>Вариант 1</b> | <b>Вариант 3</b> | <b>Вариант 4</b> |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>0</b>        | 0%               | 0%               | 0%               |
| <b>30</b>       | 6%               | 3%               | 2%               |
| <b>60</b>       | 4%               | 2%               | 2%               |
| <b>90</b>       | 9%               | 1%               | 1%               |
| <b>120</b>      | 10%              | 0%               | 1%               |
| <b>150</b>      | 9%               | 1%               | 0%               |
| <b>180</b>      | 8%               | 0%               | 1%               |
| <b>210</b>      | 7%               | 1%               | 0%               |
| <b>240</b>      | 7%               | 1%               | 2%               |
| <b>270</b>      | 6%               | 1%               | 0%               |
| <b>300</b>      | 5%               | 1%               | 2%               |
| <b>330</b>      | 5%               | 1%               | 1%               |
| <b>360</b>      | 5%               | 2%               | 3%               |
| <b>390</b>      | 5%               | 2%               | 2%               |
| <b>420</b>      | 4%               | 2%               | 3%               |
| <b>450</b>      | 4%               | 2%               | 2%               |
| <b>480</b>      | 4%               | 2%               | 3%               |
| <b>510</b>      | 4%               | 2%               | 2%               |
| <b>540</b>      | 4%               | 2%               | 2%               |

Результаты исследования позволяют сделать вывод о независимости решения от формы поперечного сечения камеры при фиксированной площади. Таким образом, дальнейшим направлением исследований условий проветривания тупиковых очистных камер является оценка влияния длины очистного пространства на процесс выноса газов из него при фиксированных объемах камеры.

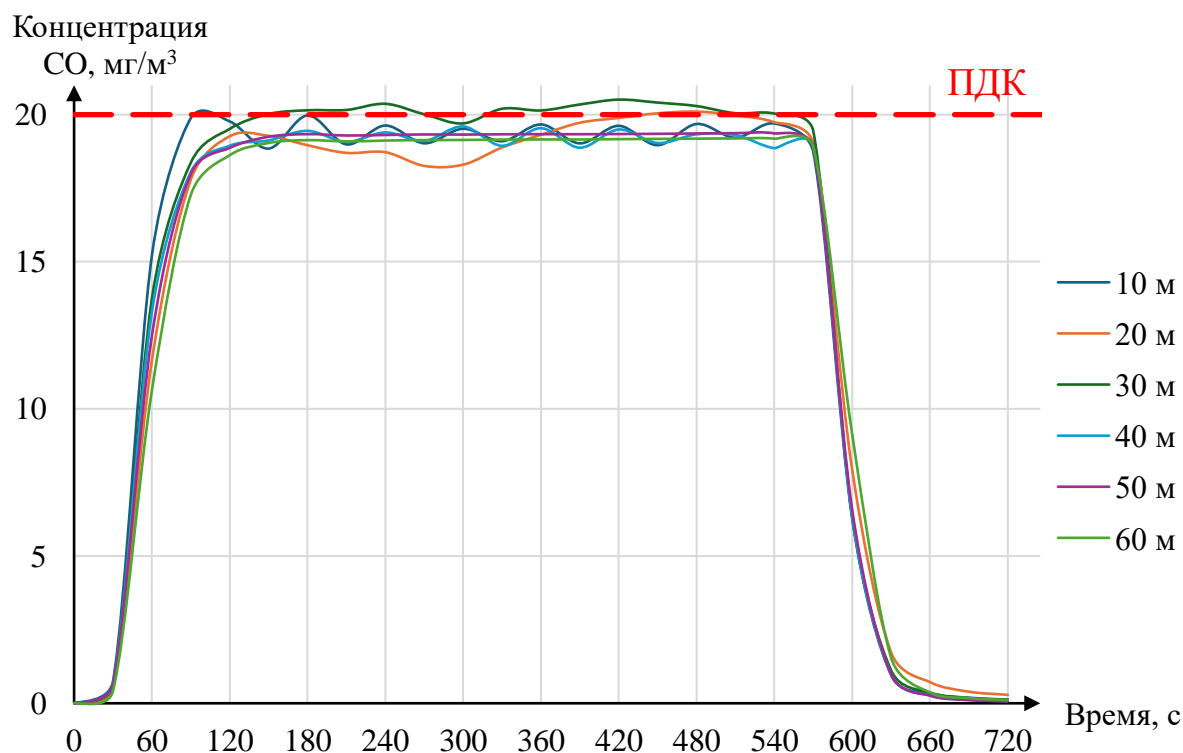
#### **4.1.2 Длина камерного пространства**

Произведено математическое моделирование проветривания обобщенной модели тупиковых очистных камер различной длины (от 10 м до 60 м). По результатам моделирования получены значения средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки. Полученные значения представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.3.

Таблица 4.3 – Значения средней концентрации СО на выходе из разрезной выработки при различных длинах очистной камеры

| Время, с | Средняя концентрация СО на выходе из разрезной выработки при различных длинах очистной камеры, мг/м <sup>3</sup> |          |          |          |          |          |
|----------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | L = 10 м   | L = 20 м | L = 30 м | L = 40 м | L = 50 м | L = 60 м |
| 0        | 0,00   | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00     |
| 30       | 0,74   | 0,54     | 0,62     | 0,66     | 0,66     | 0,42     |
| 60       | 15,21  | 11,64    | 13,74    | 13,29    | 12,48    | 10,63    |
| 90       | 19,88  | 17,80    | 18,37    | 18,05    | 17,99    | 17,27    |
| 120      | 19,77  | 19,27    | 19,52    | 18,94    | 18,87    | 18,62    |
| 150      | 18,85  | 19,28    | 20,02    | 19,12    | 19,25    | 19,04    |
| 180      | 19,97  | 18,96    | 20,15    | 19,45    | 19,34    | 19,13    |
| 210      | 18,99  | 18,70    | 20,16    | 19,08    | 19,29    | 19,09    |
| 240      | 19,63  | 18,72    | 20,37    | 19,40    | 19,31    | 19,12    |
| 270      | 19,03  | 18,26    | 20,01    | 19,11    | 19,33    | 19,14    |
| 300      | 19,52  | 18,30    | 19,70    | 19,60    | 19,32    | 19,14    |
| 330      | 19,10  | 18,88    | 20,20    | 18,94    | 19,33    | 19,15    |
| 360      | 19,67  | 19,32    | 20,14    | 19,54    | 19,34    | 19,16    |
| 390      | 19,03  | 19,73    | 20,35    | 18,88    | 19,34    | 19,16    |
| 420      | 19,62  | 19,89    | 20,51    | 19,50    | 19,34    | 19,17    |
| 450      | 18,96  | 20,05    | 20,41    | 19,04    | 19,35    | 19,18    |
| 480      | 19,68  | 20,10    | 20,29    | 19,33    | 19,36    | 19,18    |
| 510      | 19,22  | 19,98    | 20,05    | 19,30    | 19,37    | 19,19    |
| 540      | 19,70  | 19,74    | 20,04    | 18,86    | 19,36    | 19,18    |
| 570      | 18,73  | 19,01    | 19,44    | 18,92    | 18,88    | 18,89    |
| 600      | 6,27   | 7,93     | 6,33     | 6,34     | 6,57     | 9,14     |
| 630      | 0,95   | 1,73     | 1,12     | 0,98     | 0,99     | 1,55     |
| 660      | 0,34   | 0,72     | 0,37     | 0,27     | 0,26     | 0,37     |
| 690      | 0,19   | 0,39     | 0,17     | 0,12     | 0,11     | 0,18     |
| 720      | 0,13   | 0,29     | 0,11     | 0,07     | 0,06     | 0,11     |
| 750      | 0,09   | 0,23     | 0,09     | 0,05     | 0,04     | 0,08     |

В таблице 4.3 выделены красным цветом превышения предельно-допустимых концентраций. Кратковременные превышения связаны с нестационарностью процесса проветривания и турбулентностью потока воздуха.



**Рисунок 4.3 – Результаты определения средней концентрации CO на выходе из разрезной выработки при различных длинах очистного пространства**

Значения средней концентрации CO при различных длинах очистной камеры представленные в таблице Таблица 4.3 аппроксимированы экспоненциальной зависимостью в программном комплексе Wolfram Mathematica. Аппроксимация полученных в результате моделирования данных проводилась с помощью следующей функции:

$$C(t) = C_{max} - C_{max} \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{V} \cdot t}, \quad (4.1)$$

где  $C_{max}$ ,  $Q$  – известные параметры;  $V$  – проветриваемый объем камерного пространства и  $k_T$  – коэффициент эффективности проветривания (искомые параметры аппроксимации).

При аппроксимации приняты следующие значения в качестве постоянных: количество выхлопных газов после очистки равно  $0,189 \text{ м}^3/\text{с}$ ; концентрация CO равна  $1567 \text{ мг}/\text{м}^3$ ; количество воздуха, подаваемого в рабочую зону, равно  $15 \text{ м}^3/\text{с}$ . Результаты аппроксимации представлены в таблице 4.4.

**Таблица 4.4 – Результаты определения коэффициента турбулентной диффузии свободной струи и проветриваемого объема при различных длинах очистной камеры**

| Длина, м | $k_T$    | $V_{пр}$ | $R^2$ *  |
|----------|----------|----------|----------|
| 10       | 1,001385 | 319,977  | 0,999534 |
| 20       | 0,994725 | 339,672  | 0,999833 |

| Длина, м | $k_T$    | $V_{пр}$ | $R^2$ *  |
|----------|----------|----------|----------|
| 30       | 0,992015 | 328,329  | 0,999878 |
| 40       | 0,988367 | 324,257  | 0,999897 |
| 50       | 0,983128 | 326,115  | 0,999978 |
| 60       | 1,013731 | 329,428  | 0,999908 |

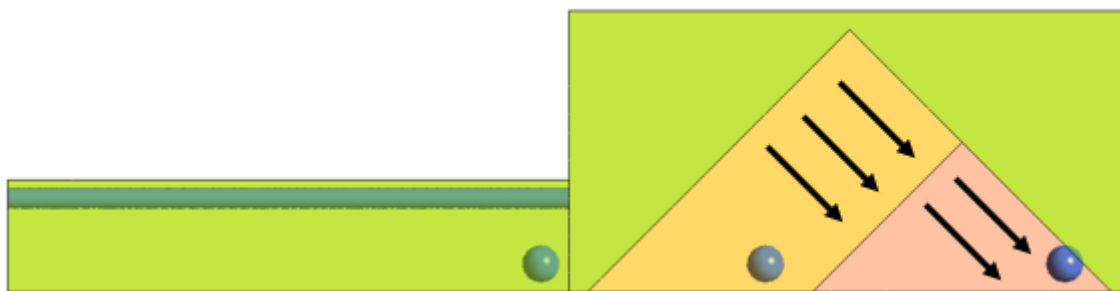
\*  $R^2$  – коэффициент детерминации полученной зависимости

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа в рабочей зоне значение коэффициента турбулентной диффузии свободной струи воздуха для условий протяженной тупиковой очистной камеры рудников Талнахского рудного узла равно 1 (при условии подачи требуемого количества воздуха в рабочую зону).

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа в рабочей зоне значения проветриваемого объема (таблица 4.4) для условий протяженной тупиковой очистной камеры рудников Талнахского рудного узла находятся в пределах  $320 \div 340 \text{ м}^3$  (при условии подачи требуемого количества воздуха в рабочую зону). Данные значения проветриваемого объема идентичны при различных длинах очистной камеры. Этот факт связан с тем, что при увеличении длины очистной камеры конфигурация проветриваемого объема очистной камеры неизменна, так как ПДМ зачищает руду в непосредственной близости к границе очистной камеры и разрезной выработки. Величина проветриваемого объема при разработке модели определяется исходя из сечения очистной камеры и длины вентиляционной струи от вентиляционного трубопровода до развала руды.

#### 4.1.3 Величина развала руды

Для учета влияния развала руды, формируемого в процессе ведения добычных работ, исследуемая геометрия построена с учетом постепенной отгрузки горной массы, появляющейся вследствие ведения взрывных работ. Смещение развала руды происходит к концу камерного пространства вследствие постепенной отгрузки руды погрузочно-доставочной машиной (рисунок 4.4). Развал руды геометрически представляет собой треугольную призму, т.к. взрывные работы осуществляются в кровлю нарезной выработки, образуя камерное пространство. Высота развала изменяется от 14 м до 0 с шагом в 1 м. Дополнительно в диапазоне между величиной развала руды 12 и 14 м – исследовано изменение высоты с шагом 0,25 м.



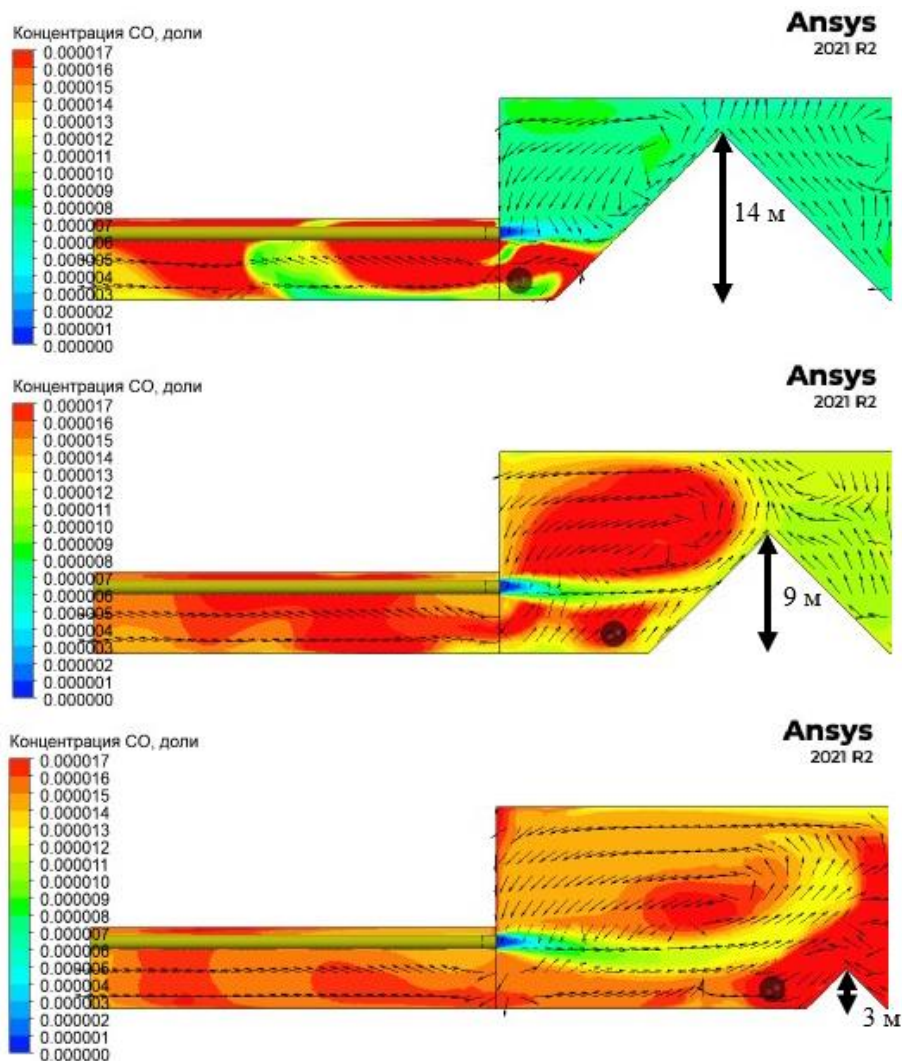
**Рисунок 4.4 – Смещение развала руды в исследуемой геометрии**

Моделирование осуществлено для трех случаев, отличающихся скоростями газовой среды. На выходе из вентиляционного става задается скорость воздуха, соответствующая подаче:

1. 17,25 кг/с воздуха в первом случае;
2. 23 кг/с воздуха во втором случае;
3. 28,75 кг/с воздуха в третьем случае.

Источник газовой выделения представлен сферой диаметром 1 м с целью упрощения расчета. В качестве газа выбран оксид углерода (CO). Скорость движения газовой смеси соответствует выделению 0,23 кг/с газа. Концентрация газа при этом соответствует 75, 100 и 125 предельно-допустимым концентрациям (в первом, втором и третьем случаях соответственно). Массовый расход и концентрация выхлопных газов подобраны таким образом, чтобы подаваемого расхода воздуха было достаточно для разжижения до предельно-допустимой концентрации.

Моделирование осуществляется в нестационарной постановке. Время работы техники с двигателем внутреннего сгорания в очистном пространстве камеры составляет 600 с. На рисунке 4.5 показан продольный разрез исследуемой геометрии по оси трубопровода в конечный момент времени.

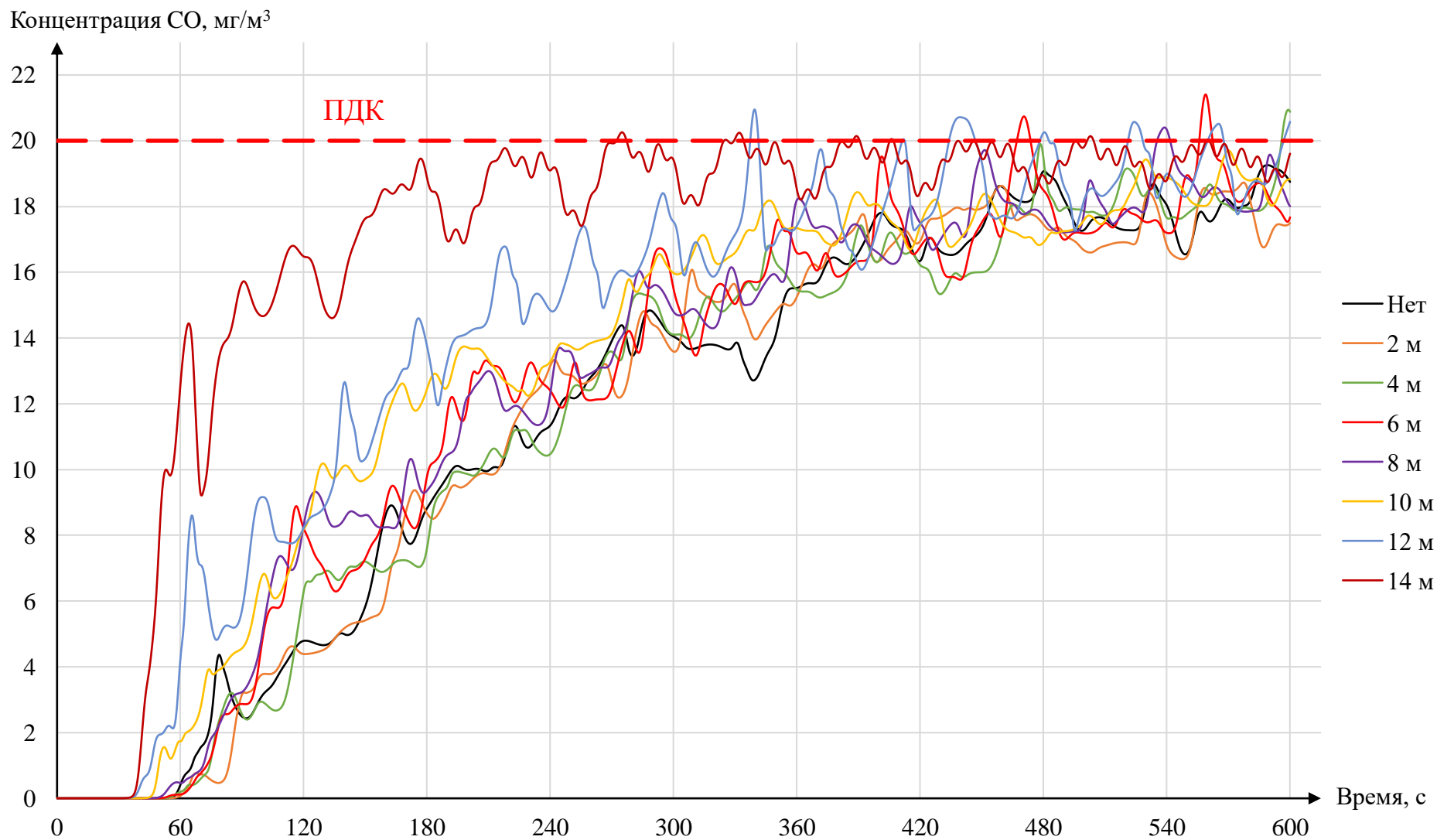


**Рисунок 4.5 – Распределение концентраций CO в продольном разрезе по оси трубопровода для камеры сложной геометрии с развалом руды высотой 14 м, 9 м и 3 м**

На рисунке видно, что если при малых высотах развала руды в выработке формируется единый вихрь, проветривающий всё ее пространство, то при достаточно больших развалах руды (9 м и более) ситуация изменяется – за развалом формируется застойная зона, в которой могут существовать один или несколько вихрей с относительно малой интенсивностью переноса массы. Наибольшие концентрации газа наблюдаются в камерном пространстве до развала руды и выносятся в разрезную выработку, где расположено рабочее место машиниста. Но при этом циркулирующий в основном вихре газ, выделяющийся из источника, может попадать в застойную область за развалом руды и находиться там продолжительное время.

С целью оценки величины концентраций газа на рабочем месте машиниста построены графики изменения средней по сечению концентрации CO на выходе из разрезной выработки для различных высот развала руды. На рисунке 4.6 представлены графики изменения концентраций.





**Рисунок 4.6 – Графики изменения концентрации вредных компонентов выхлопных газов на выходе из разрезной выработки для различных высот развала руды от времени работы техники в очистном пространстве**

Кривые на рисунке имеют колебательный характер ввиду нестационарности вихрей в разрезной выработке, однако если усреднить высокочастотные колебания концентрации газа, то можно получить основной экспоненциальный тренд изменения концентрации газа при проветривания тупиковых выработок.

С целью определения закономерностей возрастания концентраций газа в условиях изменяющегося объема развала руды полученные графики изменения концентрации вредных компонентов выхлопных газов обработаны на предмет исключения кратковременных колебаний малой амплитуды и далее аппроксимированы в программном комплексе Wolfram Mathematica. Зависимость возрастания концентрации газа от времени в тупиковой горной выработке имеет экспоненциальный характер [47]:

$$C(t) = C_{max} \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{V} \cdot t}, \quad (4.2)$$

где  $C(t)$  – зависимость изменения концентрации газа от времени  $t$ ;  $C_{max}$  – максимально возможная концентрация газа;  $k_T$  – коэффициент турбулентной диффузии струи;  $Q$  – количество воздуха, подаваемого на проветривание, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – проветриваемый объем тупиковой выработки, м<sup>3</sup>.

Максимально возможная концентрация газа определяется согласно закону сохранения масс с использованием параметров газовыделения техники с двигателем внутреннего сгорания [53]:

$$C_{max} = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q}, \quad (4.3)$$

где  $g_{ex}$  – объемный расход выхлопных газов машины, м<sup>3</sup>/с;  $C_{ex}$  – концентрация вредных компонентов в выхлопных газах машины.

Модель, описанная уравнением (4.2), включает понятие «коэффициент турбулентной диффузии струи», которое не совпадает с общепринятым термином коэффициента турбулентной диффузии в гидрогазодинамике. В настоящей работе данный коэффициент назван «коэффициентом эффективности проветривания».

Зависимости концентрации газа на выходе из разрезной выработки аппроксимированы с использованием следующей функции:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q} - \left( \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{k_T \cdot Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{k_V \cdot V} \cdot t}, \quad (4.4)$$

где  $g_{ex}$ ,  $C_{ex}$ ,  $C_0$ ,  $Q$ ,  $V$  – известные параметры;  $k_T$ ,  $k_V$  – коэффициент эффективности проветривания и поправочный объемный коэффициент (искомые параметры аппроксимации).

Функция (4.4) получена путем объединения классической зависимости возрастания газа по Воронину (4.2) и результатов исследований «Уральского

федерального университета» в области максимально возможного значения концентрации газа в тупиковой выработке при работе погрузочно-доставочной машины, описанного выражением (4.3). Результаты аппроксимации представлены в таблице 4.5.

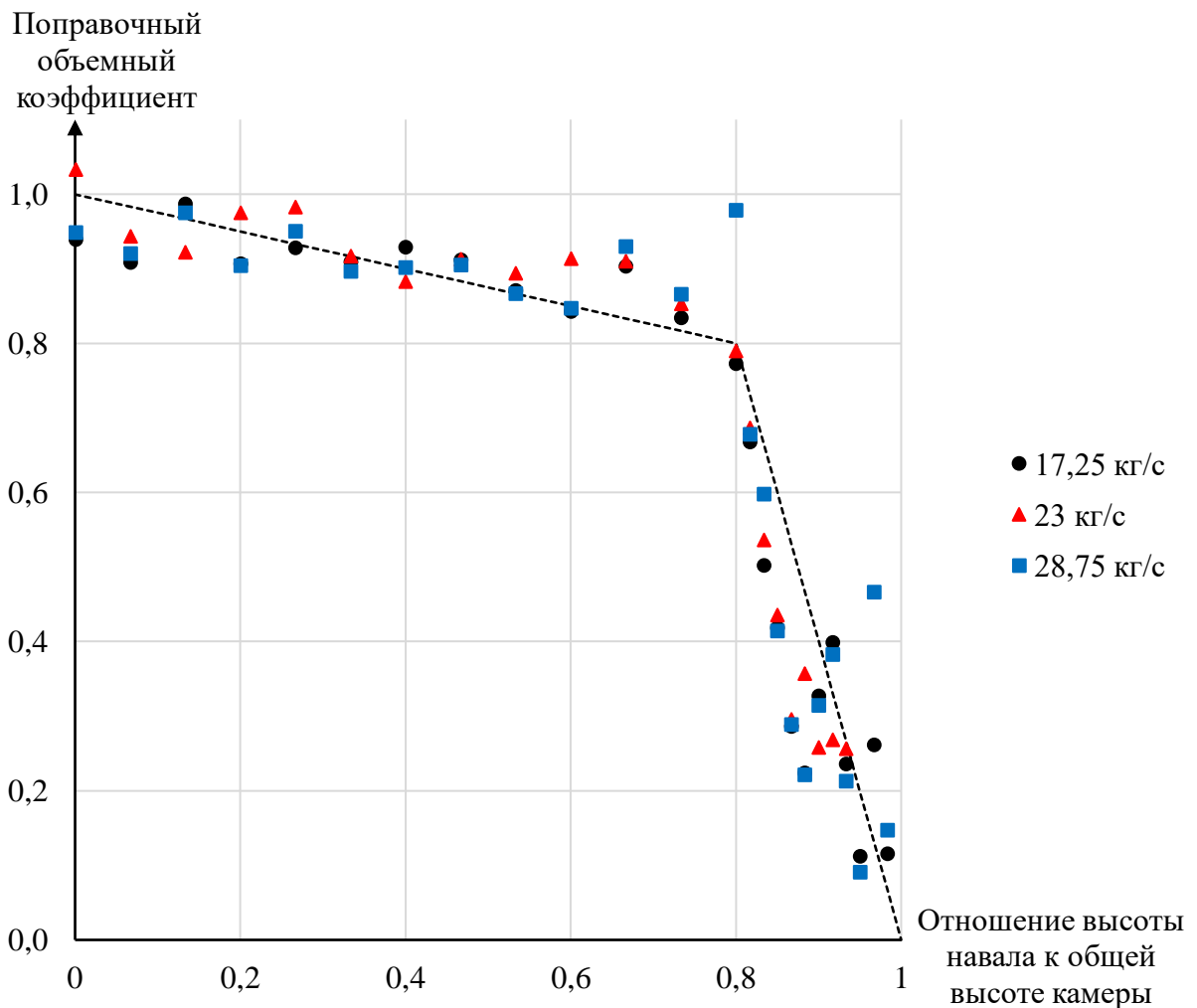
Таблица 4.5 – Результаты определения искомых параметров аппроксимации для первого случая (подача 23 кг/с воздуха)

| Параметры<br>аппроксимации |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| Высота развала             | $k_T$  | $k_V$  | $R^2$  |
| Без развала                | 0,9631 | 1,1300 | 0,9968 |
| 1 м                        | 0,9619 | 1,1009 | 0,9968 |
| 2 м                        | 1,0114 | 1,0186 | 0,9965 |
| 3 м                        | 1,0051 | 0,9827 | 0,9961 |
| 4 м                        | 1,0029 | 1,0070 | 0,9969 |
| 5 м                        | 1,0132 | 0,9354 | 0,9935 |
| 6 м                        | 1,0421 | 0,8773 | 0,9950 |
| 7 м                        | 1,0425 | 0,9011 | 0,9943 |
| 8 м                        | 1,0417 | 0,8737 | 0,9962 |
| 9 м                        | 1,0434 | 0,8437 | 0,9975 |
| 10 м                       | 1,0561 | 0,8444 | 0,9979 |
| 11 м                       | 1,0294 | 0,8221 | 0,9948 |
| 12 м                       | 1,0244 | 0,7939 | 0,9955 |
| 12,25 м                    | 1,0428 | 0,644  | 0,9784 |
| 12,5 м                     | 1,0319 | 0,4964 | 0,9810 |
| 12,75 м                    | 1,0518 | 0,3593 | 0,9751 |
| 13 м                       | 1,0409 | 0,2443 | 0,9795 |
| 13,25 м                    | 1,0707 | 0,2738 | 0,9892 |
| 13,5 м                     | 1,0430 | 0,2260 | 0,9809 |
| 13,75 м                    | 1,0412 | 0,2390 | 0,9817 |
| 14 м                       | 1,1661 | 0,0054 | 0,9689 |

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки для различных высот развала руды значение коэффициента турбулентной диффузии свободной струи воздуха для условий протяженной тупиковой очистной камеры рудников Талнахского рудного узла равно единице (при условии подачи требуемого количества воздуха в рабочую зону). С учетом этого произведена аппроксимация полученных зависимостей по следующей функции:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - \left( \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{Q}{k_V \cdot V} t}. \quad (4.5)$$

Функция (4.5) получена из функции (4.4) путем приравнивания коэффициента эффективности проветривания к единице. На рисунке 4.7 представлен график зависимости поправочного объемного коэффициента от отношения высоты развала к общей высоте камеры.



**Рисунок 4.7 – Зависимость поправочного объемного коэффициента от отношения высоты развала к общей высоте камеры**

По результатам аппроксимации полученных значений средней концентрации газа на выходе из разрезной выработки для различных высот развала руды и различных массовых расходов воздуха из вентиляционного трубопровода значение поправочного объемного коэффициента лежит в пределах от 0,1 до 1. Как видно из рисунка 4.7, при соотношении высоты развала к общей высоте камеры от 0 до 0,8 значение поправочного объемного коэффициента находится в пределах 0,8÷1. При соотношении выше 0,8 значение поправочного объемного коэффициента резко снижается. Это связано с уменьшением фактического объема проветривания ввиду условного разделения камерного пространства на два принципиально различных с точки зрения проветривания объема (рисунок 4.5).

Как видно из рисунка 4.7, вид зависимости поправочного объемного коэффициента от соотношения высоты развала руды к общей высоте камерного пространства – кусочная, с разрывом при относительной высоте развала 0,8. Полученные

на графике, представленном на рисунке 4.7, значения аппроксимированы. Определенная зависимость следующая:

$$k_V = \begin{cases} -0,25 \frac{H_H}{H_K} + 1, & \frac{H_H}{H_K} \leq 0,8 \\ -4 \frac{H_H}{H_K} + 4, & \frac{H_H}{H_K} > 0,8 \end{cases}, \quad (4.6)$$

где  $H_H$  – высота развала руды, м;  $H_K$  – высота очистного пространства камеры, м.

Необходимо отметить, что относительная высота развала свыше 0,8 на практике имеет достаточно короткий жизненный цикл. Объем развала руды в пределах относительной высоты  $0,8 \div 1$  составляет 36% от общего объема руды. Более того, технологический процесс выстроен так, чтобы отгрузка горной массы производилась в течение одной смены. Таким образом, две трети времени работы по отгрузке руды относительная высота развала находится в пределах  $0 \div 0,8$ .

Коэффициент корреляции второй части полученной зависимости (4.6) при  $\frac{H_H}{H_K} > 0,8$  достаточно низок, ввиду сильной нестационарности выноса газа из объема за развалом руды. Поэтому практическую значимость имеет только первая часть зависимости (4.6).

С учетом первой части полученной зависимости (4.6) при  $\frac{H_H}{H_K} \leq 0,8$  аналитическая модель выноса газов из очистного пространства тупиковой камеры принимает вид:

$$C(t) = \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - \left( \frac{g_{ex} \cdot C_{ex}}{Q} - C_0 \right) \cdot e^{-\frac{Q}{(-0,25 \frac{H_H}{H_K} + 1) \cdot V} t}. \quad (4.7)$$

Данная зависимость возрастания концентрации газа на рабочем месте горнорабочего получена с учетом геометрических параметров выработки и требует оценки влияния аэродинамических параметров проветривания тупиковых камер.

#### **4.2 Исследование влияния аэродинамических параметров проветривания на процесс выноса вредных веществ выхлопных газов самоходного горно-шахтного оборудования с двигателем внутреннего сгорания из очистного пространства**

Аэродинамическими параметрами проветривания тупиковых очистных камер при фиксированном количестве воздуха являются скорость воздушного потока, выходящего из вентиляционного трубопровода, а также величина отставания вентиляционного трубопровода.

#### **4.2.1 Исследование влияния скорости воздушного потока**

Произведено математическое моделирование проветривания обобщенной модели тупиковых очистных камер при различных скоростях движения воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода, при одинаковом количестве воздуха, соответствующем расчетному. Выбраны используемые на рудниках диаметры вентиляционных трубопроводов.

На рисунке 4.8 приведен график изменения концентрации оксида углерода при различных скоростях движения воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода.

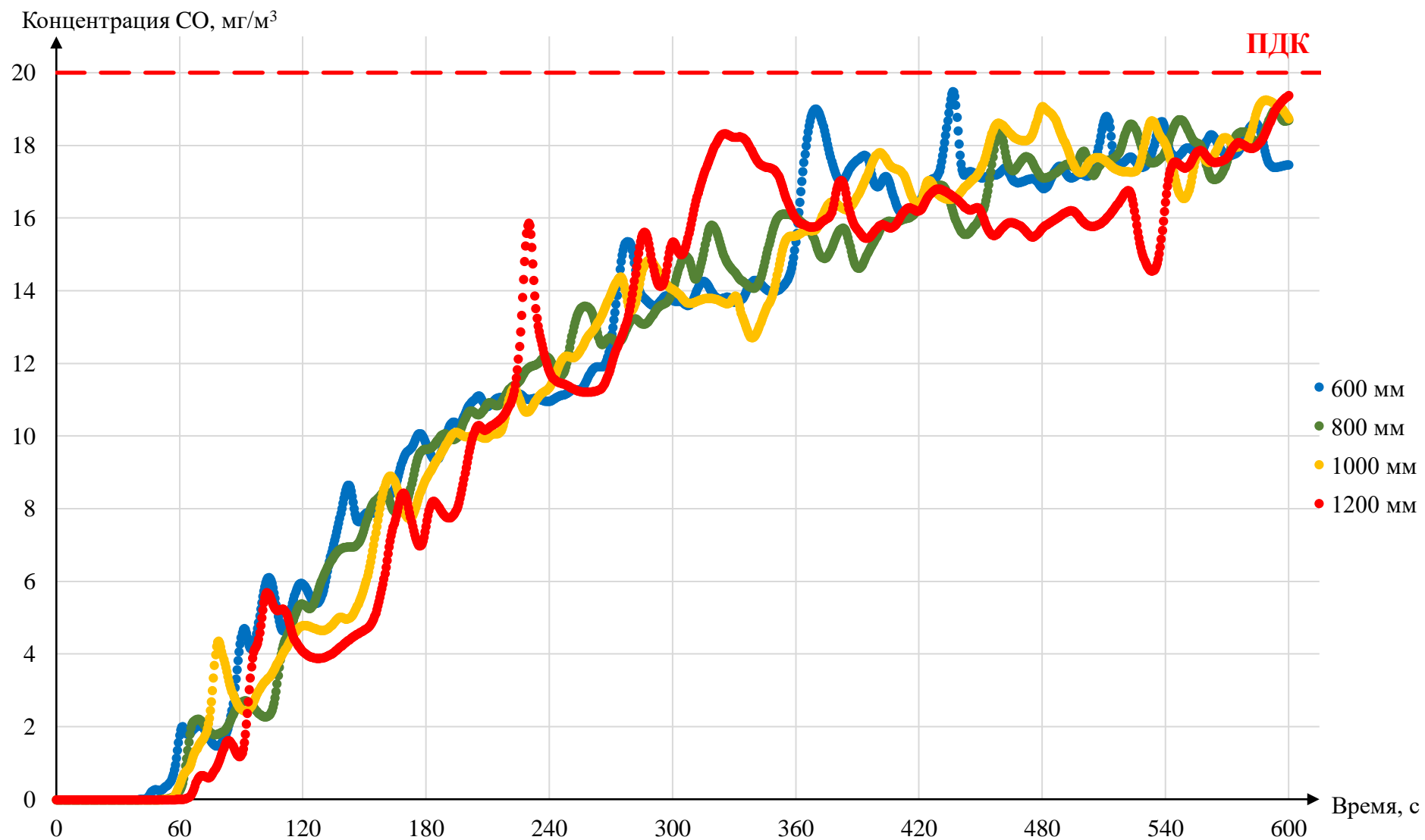


Рисунок 4.8 – График изменения концентрации оксида углерода (доли) при различных скоростях движения воздуха

На рисунке 4.8 видно, что различные скорости воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода, при одинаковом количестве воздуха не приносят существенных изменений в общую динамику возрастания концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ.

#### **4.2.2 Исследование влияния отставания вентиляционного трубопровода от устья очистной камеры**

Произведено математическое моделирование проветривания обобщенной модели тупиковых очистных камер при различных отставаниях из вентиляционного трубопровода. В пространство очистной камеры подается расчетное количество воздуха. Выбраны используемые на рудниках диаметры вентиляционных трубопроводов.

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 приведены графики изменения концентрации оксида углерода при различных скоростях движения воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода.



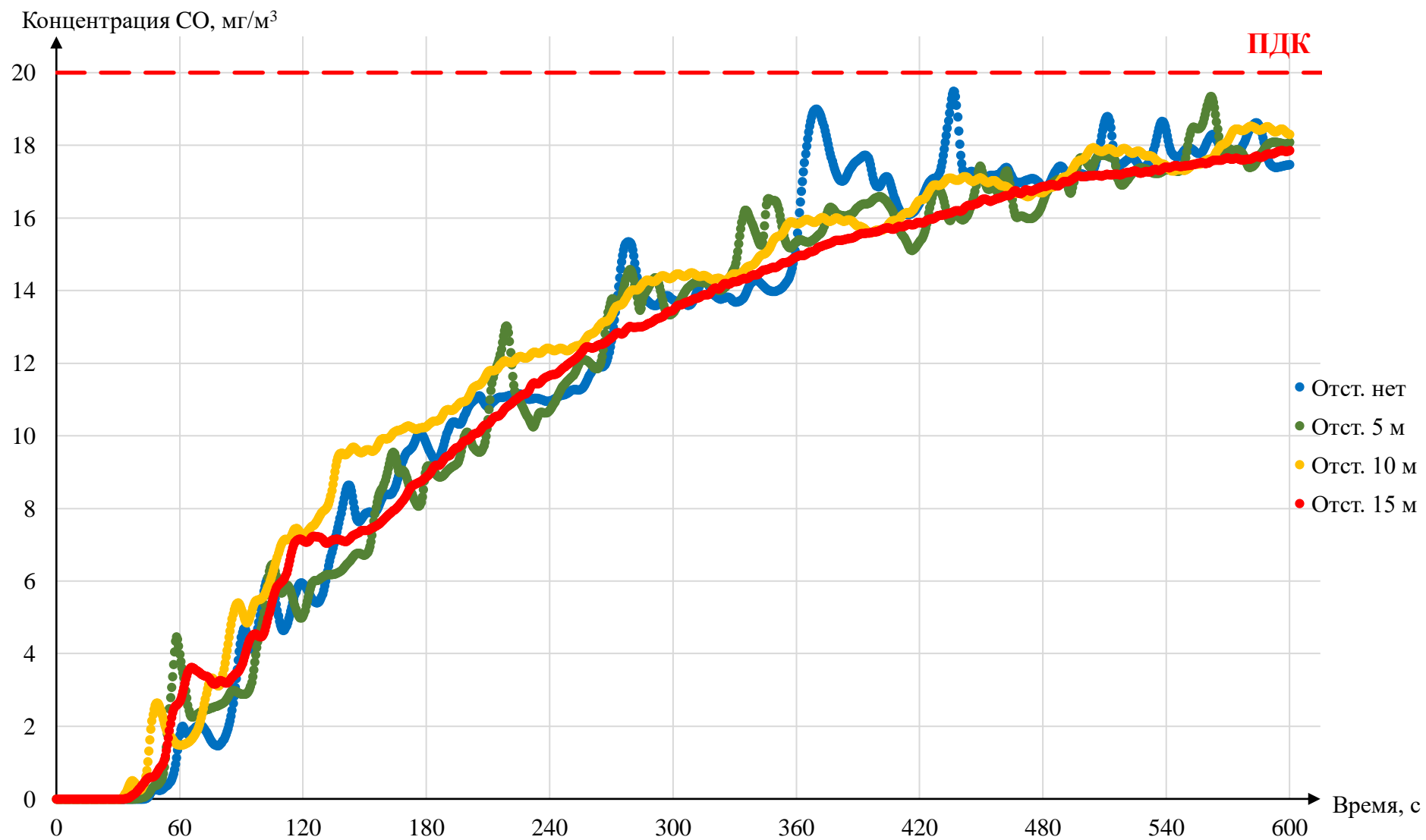


Рисунок 4.9 – График изменения концентрации оксида углерода при различных величинах отставания вентиляционного трубопровода (диаметр 600 мм) от камерного пространства

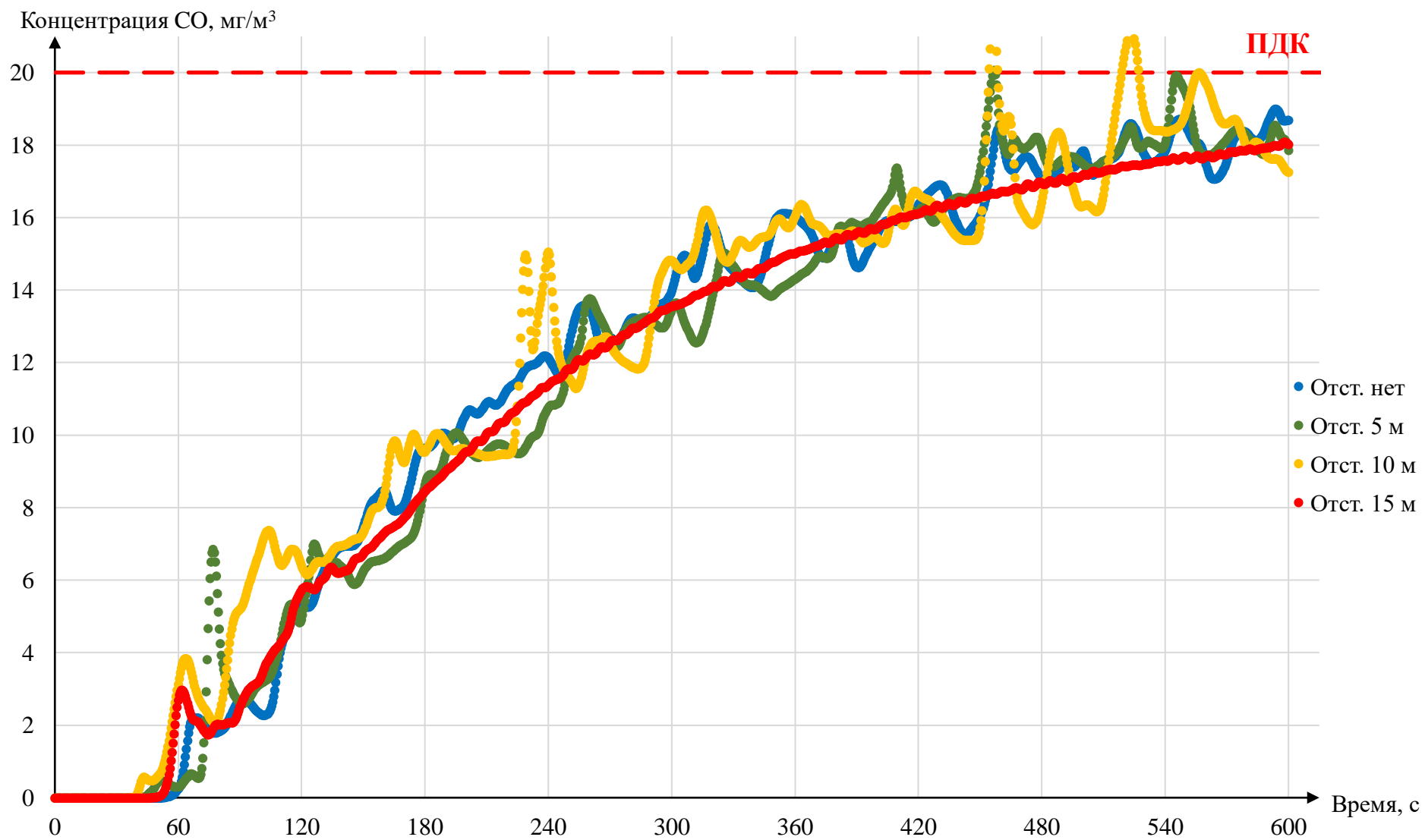


Рисунок 4.10 – График изменения концентрации оксида углерода при различных величинах отставания вентиляционного трубопровода (диаметр 800 мм) от камерного пространства

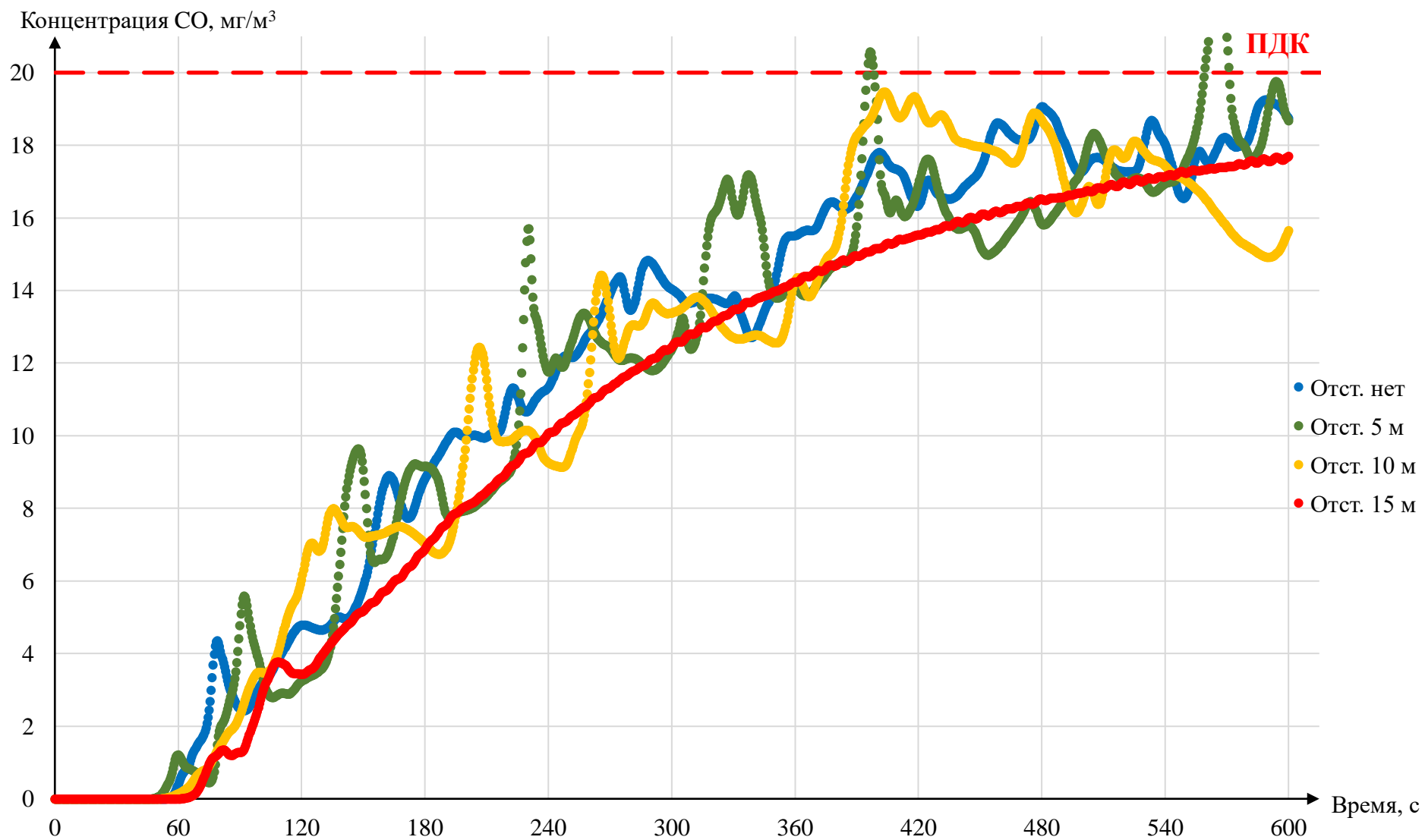


Рисунок 4.11 – График изменения концентрации оксида углерода при различных величинах отставания вентиляционного трубопровода (диаметр 1000 мм) от камерного пространства

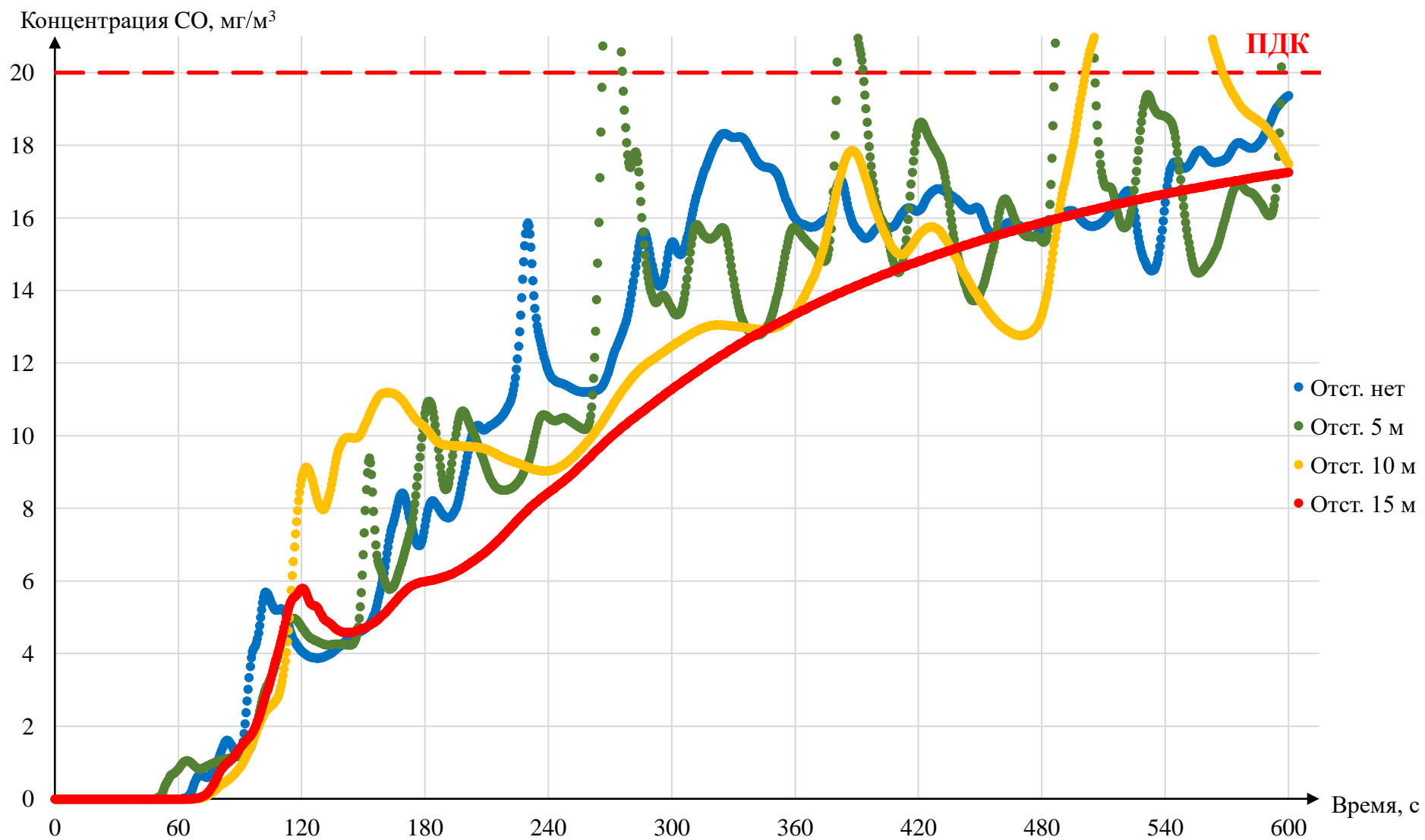


Рисунок 4.12 – График изменения концентрации оксида углерода при различных величинах отставания вентиляционного трубопровода (диаметр 1200 мм) от камерного пространства

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 видно, что различные отставания вентиляционного трубопровода от устья камерного пространства не приносят существенных изменений в общую динамику возрастания концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ, расположенного в устье камерного пространства.

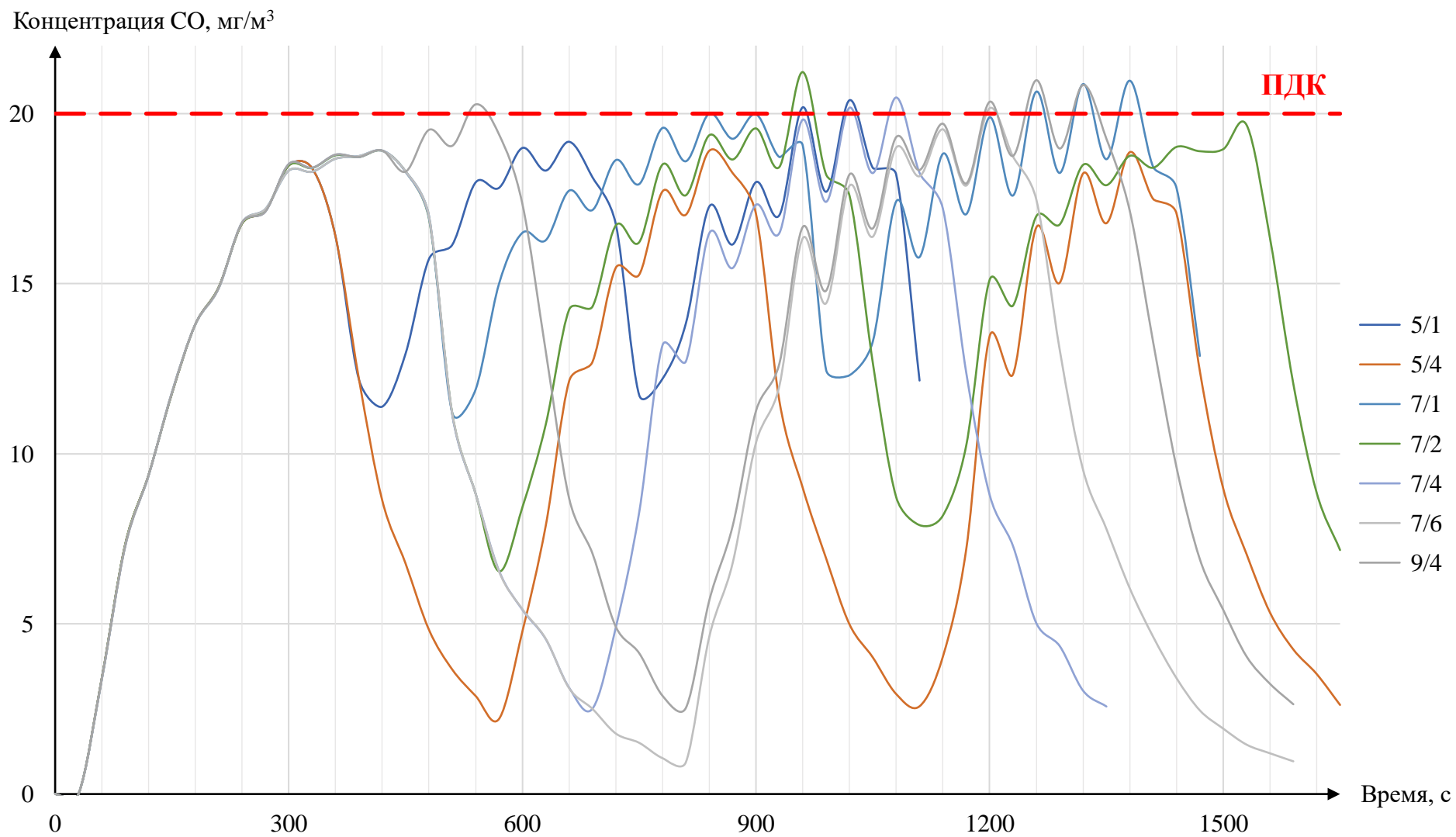
### **4.3 Исследование влияния производственного цикла**

В рамках исследования произведена оценка зависимости возрастания средней концентрации СО на выходе из разрезной выработки от времени работы ПДМ в камере, а также зависимости снижения средней концентрации газов на выходе из разрезной выработки от времени отсутствия ПДМ в камере.

Исследуемые производственные циклы:

- «5/1» – 5 минут ПДМ работает, 1 минуту отсутствует;
- «5/4» – 5 минут ПДМ работает, 4 минуты отсутствует;
- «7/1» – 7 минут ПДМ работает, 1 минуту отсутствует;
- «7/2» – 7 минут ПДМ работает, 2 минуты отсутствует;
- «7/4» – 7 минут ПДМ работает, 4 минуты отсутствует;
- «7/6» – 7 минут ПДМ работает, 6 минут отсутствует;
- «9/4» – 9 минут ПДМ работает, 4 минуты отсутствует.

По результатам моделирования получены поля концентраций СО по сечению выхода из расчетной области. Результаты представлены в виде графиков зависимости средней концентрации СО на выходе из разрезной выработки от времени на рисунке 4.13.



**Рисунок 4.13 – Графики зависимости средней концентрации СО на выходе из разрезной выработки от времени при различных производственных циклах работы ПДМ**

Из рисунка 4.13 видно, что зависимость возрастания/снижения средней концентрации СО на выходе из разрезной выработки от времени работы/отсутствия ПДМ в камере имеет экспоненциальную зависимость при различных производственных циклах на каждом из циклов работы ПДМ, а также с увеличением времени работы ПДМ в камере концентрация СО достигает асимптотического максимума.

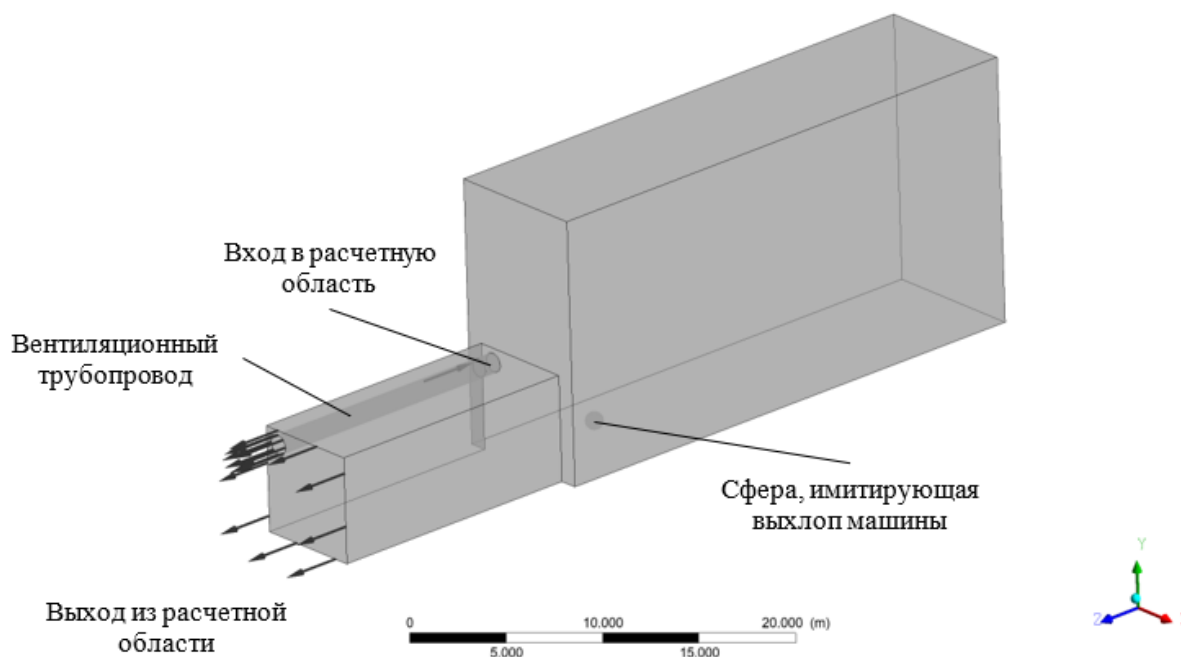
При моделировании работы ПДМ по отгрузке полезного ископаемого из пространства очистной камеры наблюдаются кратковременные превышения предельно-допустимого значения концентрации СО ( $20 \text{ мг/м}^3$ ) в сечении разрезной выработки. Это говорит о необходимости предварительного аналитического определения максимального времени нахождения ПДМ в очистном пространстве камеры при производстве отгрузки полезного ископаемого.

#### **4.4 Исследование влияния качественного состава рудничной атмосферы, подаваемой на проветривание**

Для исследования влияния качественного состава рудничной атмосферы, подаваемой на проветривание построена модель обобщенной очистной камеры. Геометрические параметры соответствуют геометрическим параметрам очистных тупиковых горных выработок подземных рудников Талнахского рудного узла (РФ, Красноярский край): площадь сечения нарезной выработки равна  $36 \text{ м}^2$ , максимальная высота камерного пространства – 15 м, ширина камерного пространства – 8 м, длина камерного пространства – 30 м, диаметр вентиляционного трубопровода 1 м.

Исследуемая расчетная область разбивается на конечные элементы, а решаемая система математических уравнений записывается в конечно-объемной форме. В процессе исследования построено несколько конечно-объемных сеток разного качества для анализа независимости получаемого решения от способа дискретизации расчетной области. В результате анализа выбрана конечно-объемная сетка со следующими общими свойствами: размерность расчетной сетки составила 0,5 м со сгущением сетки вблизи вентиляционного трубопровода до 0,2 м; количество узлов – 1 089 528; количество объемов (элементов) – 2 715 350.

На выходе из вентиляционного става задается скорость воздуха, интенсивность турбулентности  $I_{turb} = 2\%$ , масштаб вихрей турбулентности  $l_{turb} = 0,2 \text{ м}$ . Воздушный поток, омывая очистную камеру и разрезной штрек, покидает расчетную область через поверхность, на которой задается нулевое статическое давление [13,30,45]. На стенках горных выработок задается «прилипание» потока. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок. Величина шероховатости стенок выработок равна 30 мм [105].



**Рисунок 4.14 – Расчетная область с указанными граничными условиями модели**

На рисунке 4.14 представлена расчетная область с указанными граничными условиями входа в расчетную область на конце трубопровода и выхода из расчетной области (из разрезной выработки). В очистном пространстве камерообразной выработки имеется сфера, которая в дальнейшем используется в качестве источника газовыделения, имитирующего выхлоп погрузочно-доставочной машины.

Полученные по результатам моделирования зависимости концентрации CO на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве аппроксимированы в программном комплексе Wolfram Mathematica. Аппроксимация полученных в результате моделирования данных проводилась с помощью следующей функции:

$$C(t) = C_{max} - (C_{max} - C_0) \cdot e^{-\frac{k_T \cdot Q}{V} t}, \quad (4.8)$$

где  $C_{max}$ ,  $C_0$ ,  $Q$ ,  $V$  – известные параметры;  $k_T$  – коэффициент эффективности проветривания (искомый параметр аппроксимации).

На рисунке 4.15 представлены зависимости концентрации CO на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины от времени работы машины, полученные по результатам моделирования (точки) и результатам аппроксимации (линии) при различных начальных концентрациях газа в очистном пространстве камеры.



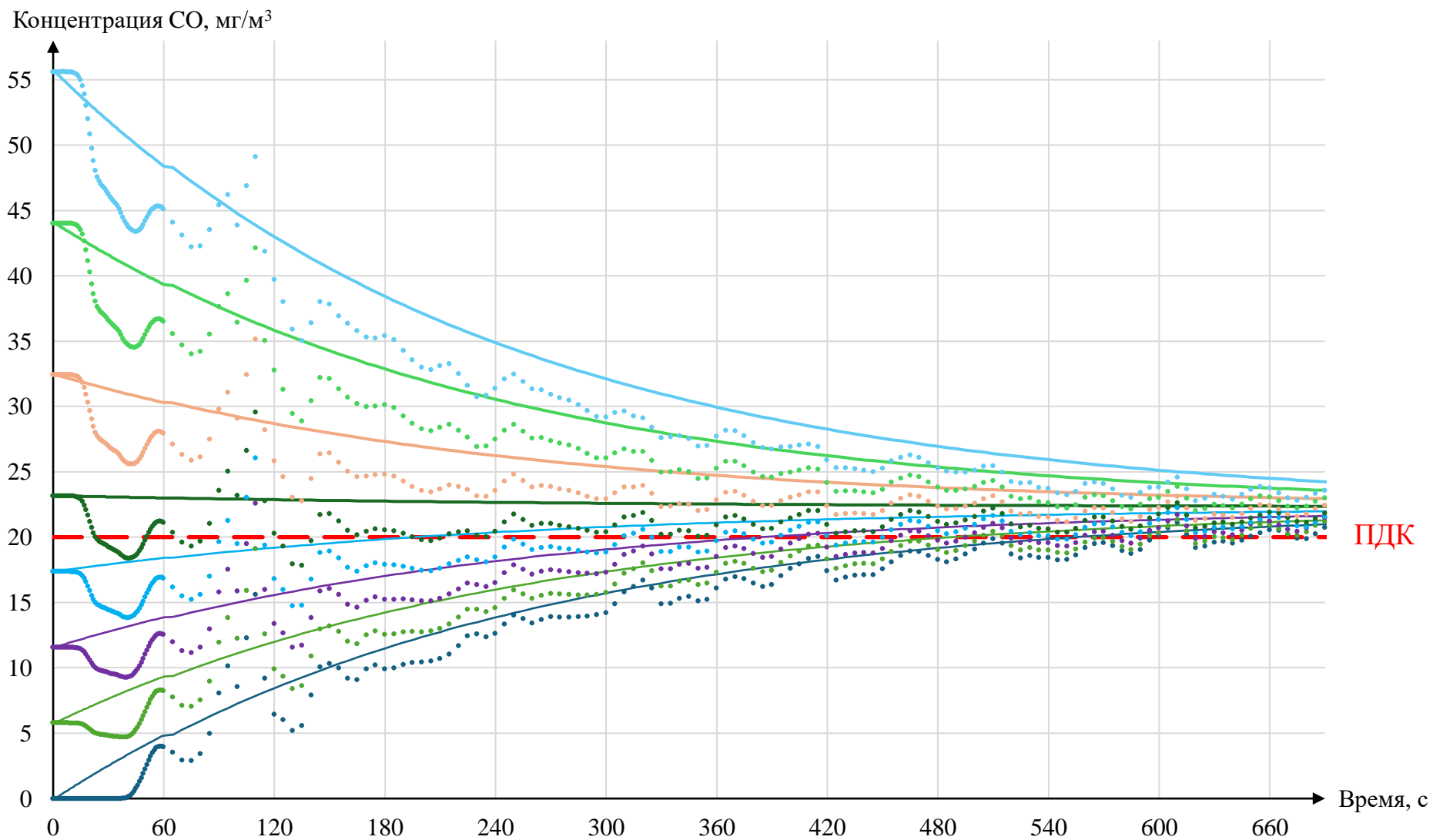


Рисунок 4.15 – Зависимости концентрации CO на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины от времени работы машины, полученные по результатам моделирования (точки) и результатам аппроксимации (линии)

Колебания численно рассчитанных кривых концентрации (рисунок 4.15) связаны с принципиальной нестационарностью массопереноса в очистном пространстве, постоянным изменением структуры вихрей в очистном пространстве и на его сопряжении с разрезной горной выработкой.

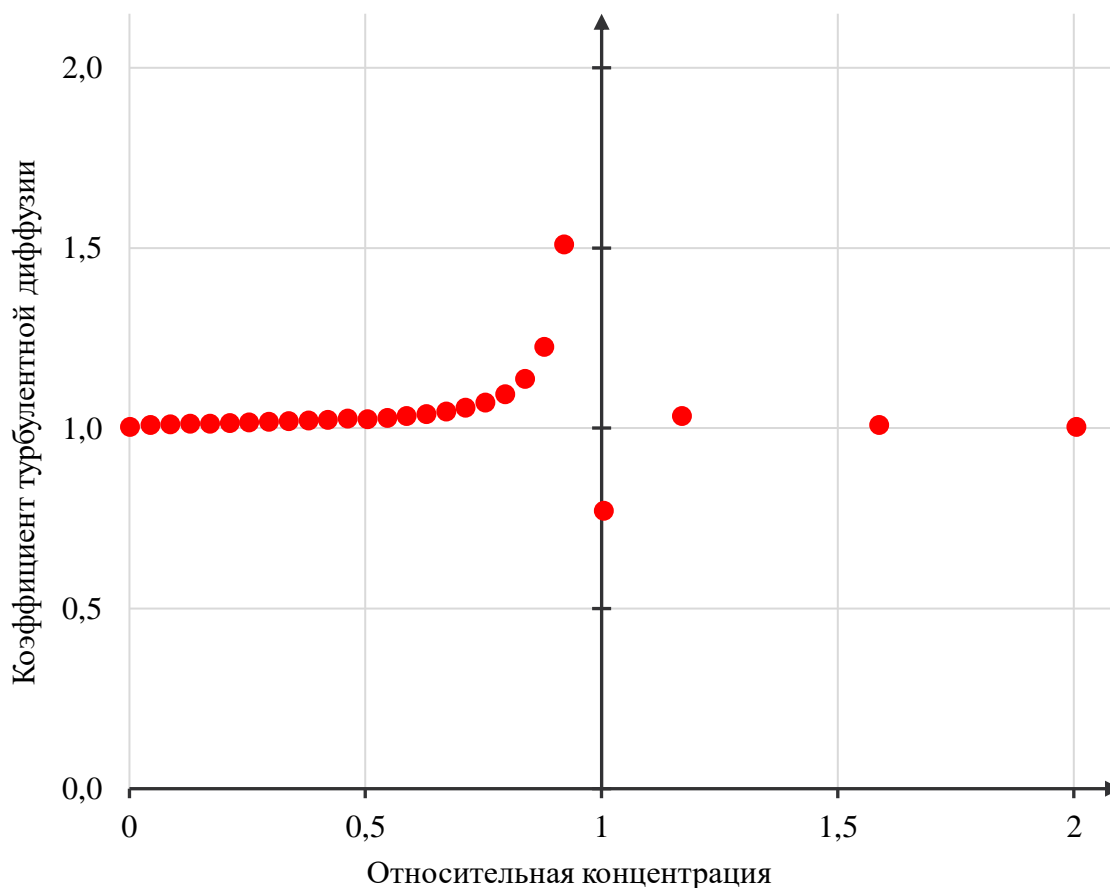
В таблице 4.6 приведены полученные значения коэффициента эффективности проветривания  $k_T$  в результате аппроксимации численных точек с помощью зависимости (4.8) по методу наименьших квадратов. Также указан коэффициент детерминации  $R^2$  аппроксимированных кривых.

Таблица 4.6 – Полученные коэффициенты аппроксимации

| $C_0$ | $C' = \frac{C_0}{C_{\max}}$ | $k_T$   | $R^2$    |
|-------|-----------------------------|---------|----------|
| 0,0   | 0,0021323                   | 1,00188 | 0,997873 |
| 1,2   | 0,0450642                   | 1,00633 | 0,997485 |
| 2,3   | 0,0874581                   | 1,00806 | 0,995823 |
| 3,5   | 0,129610                    | 1,00963 | 0,993106 |
| 4,6   | 0,171613                    | 1,01113 | 0,989403 |
| 5,8   | 0,213477                    | 1,01260 | 0,984787 |
| 7,0   | 0,255237                    | 1,01409 | 0,979337 |
| 8,1   | 0,296938                    | 1,01569 | 0,973133 |
| 9,3   | 0,338605                    | 1,01746 | 0,966257 |
| 10,5  | 0,380258                    | 1,01950 | 0,958788 |
| 11,6  | 0,421905                    | 1,02184 | 0,950807 |
| 12,8  | 0,463550                    | 1,02460 | 0,942388 |
| 13,9  | 0,505207                    | 1,02292 | 0,933636 |
| 15,1  | 0,546855                    | 1,02644 | 0,924573 |
| 16,3  | 0,588507                    | 1,03087 | 0,915275 |
| 17,4  | 0,630163                    | 1,03659 | 0,905801 |
| 18,6  | 0,671822                    | 1,04415 | 0,896203 |
| 19,8  | 0,713484                    | 1,05457 | 0,88653  |
| 20,9  | 0,755148                    | 1,06955 | 0,876825 |
| 22,1  | 0,796815                    | 1,09295 | 0,867127 |
| 23,2  | 0,838486                    | 1,13434 | 0,857471 |
| 24,4  | 0,880160                    | 1,22415 | 0,847888 |
| 25,6  | 0,921838                    | 1,50774 | 0,838407 |
| 26,7  | 0,963519                    | 3,23015 | 0,829071 |
| 27,9  | 1,005200                    | 0,76961 | 0,819549 |
| 32,5  | 1,171960                    | 1,03109 | 0,790243 |

| $C_0$ | $C' = \frac{C_0}{C_{\max}}$ | $k_T$   | $R^2$    |
|-------|-----------------------------|---------|----------|
| 44,2  | 1,588990                    | 1,00673 | 0,719524 |
| 55,8  | 2,006200                    | 1,00073 | 0,666302 |

Полученные результаты для зависимости коэффициента  $k_T$  от безразмерной концентрации газа  $C'$  также представлены графически на рисунке 4.16.



**Рисунок 4.16 – Зависимость  $k_T$  от  $C'$**

Как видно из таблицы 4.6 и рисунка 4.16 при  $|C' - 1| > 0,2$  коэффициент эффективности проветривания  $k_T$  близок к единице, при  $C' \rightarrow 1$  коэффициент эффективности проветривания  $k_T$  устремляется к бесконечности ввиду возрастающей неопределенности процедуры аппроксимации.

Произведена оценка возможности применения коэффициента  $k_T = 1$  при аналитическом расчете концентрации газа от времени. Рассмотрены случаи, когда  $k_T \gg 1$  из таблицы 4.6 (случаи, когда начальная концентрация в камере равна:  $C_0 = 25,6 \text{ мг/м}^3$ ,  $C_0 = 26,7 \text{ мг/м}^3$ ,  $C_0 = 27,9 \text{ мг/м}^3$ ). Среднее отклонение аналитически определенных кривых зависимости концентрации газа на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве при коэффициентах эффективности

проветривания  $k_T$ , определенных по результатам аппроксимации, и  $k_T = 1$  в данных случаях составило не более 1 %. Это связано с тем, что при значениях  $C'$  близких к единице функция концентрации газа на рабочем месте машиниста от времени работы машины в камерном пространстве  $C(t)$  становится достаточно близка к прямой равной  $C(t) = C_{max}$ . А ввиду присутствия шума от временных колебаний концентрации газа выбор значения  $k_T$  практически не влияет качество аппроксимации численных точек зависимостью (4.8).

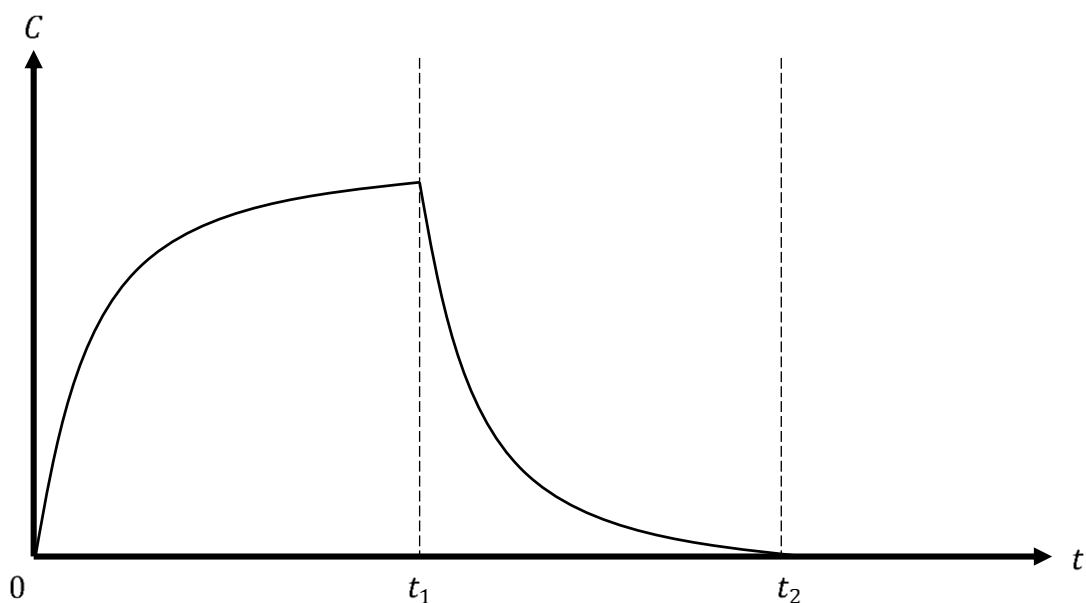
Таким образом, определен коэффициент эффективности проветривания  $k_T$ , используемый в аналитической модели изменения концентрации газа на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины при ее работе в очистном пространстве тупиковой камерообразной выработке, учитывающий аэродинамические параметры проветривания, геометрические параметры очистного пространства и параметров газовыделения погрузочно-доставочной машины. Результаты численного моделирования показали, что коэффициент эффективности проветривания  $k_T$  одинаков для возрастания и снижения концентрации газов от времени.

#### **4.5 Комплексный анализ влияния различных факторов**

В результате исследований, приведенных в предыдущих разделах, можно сделать вывод, что математическая модель, описывающая процесс выделения газа при производстве отгрузки руды из очистного пространства тупиковых камер, следующая:

$$C(t) = C_{max} - (C_{max} - C_0) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t}. \quad (4.9)$$

Присутствие источника газовыделения в тупиковых камерообразных выработках при производстве отгрузки руды из очистного пространства имеет периодический характер (рисунок 4.17).



**Рисунок 4.17 – Фрагмент зависимости  $C(t)$  при реальном цикле работы машины в выработке**

В момент времени  $0 \leq t \leq t_1$  происходит возрастание концентрации за счет работы машины в очистном пространстве. Характер кривой  $C(t)$  описывается выражением (4.9).

В момент времени  $t_1 \leq t \leq t_2$  происходит снижение концентрации. Характер кривой  $C(t)$  описывается выражением:

$$C_1(t) = C_1(t_1) \cdot e^{-\frac{Q}{V}(t-t_1)}. \quad (4.10)$$

Выражение (4.10) получено из (4.9) при  $C_{max} = 0$ . Здесь коэффициент эффективности проветривания  $k$  также равен 1.

Полученные выражения зависимостей возрастания и снижения концентраций газа могут быть использованы для анализа динамики концентрации вредных примесей при циклической работе ПДМ. Это может быть сделано путем построения кусочно-экспоненциальной функции, составленной из функций вида (4.9) и (4.10).

#### 4.6 Выводы по главе

Проведенные исследования влияния различных факторов на проветривание очистной тупиковой камерообразной горной выработки позволяют сформулировать следующие выводы:

- Форма поперечного сечения камеры при ее фиксированном объеме не влияет на общую динамику концентрации газа в пространстве разрезной выработки.
- Величина проветриваемого объема при разработке модели определяется исходя из сечения очистной камеры и длины вентиляционной струи от вентиляционного трубопровода до развала руды.
- Отставание вентиляционного трубопровода от устья очистной камеры и скорость воздушного потока, выходящего из вентиляционного трубопровода, не влияет на общую динамику концентрации газа в рабочей зоне машиниста ПДМ, расположенного в разрезной выработке устье камерного пространства.
- Получена математическая модель, описывающая процесс выделения газа при производстве отгрузки руды из очистного пространства тупиковых камер.

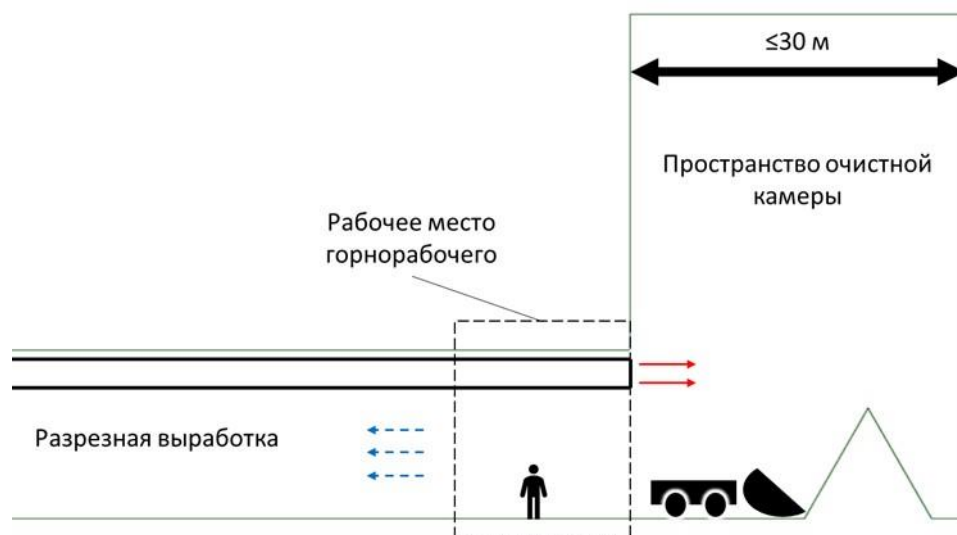
Полученная математическая модель позволяет перейти к практическому применению результатов исследования в части обоснования возможности применения тупиковых очистных камер большой длины.

## 5 ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТУПИКОВЫХ КАМЕР

В настоящей главе диссертационной работы на основании исследований, представленных в четвертой главе, изложены принципы организации проветривания тупиковых камер длиной до 60 м. Приведена экономическая оценка оптимизации применяемых на предприятии систем разработки с внедрением тупиковых камер длиной до 60 м.

### 5.1 Методика расчета требуемого количества воздуха и организации проветривания тупиковых камерообразных горных выработок

Тупиковая камерообразная выработка образуется за счет расширения разрезной выработки при обратном порядке отработки (рисунок 5.1).



**Рисунок 5.1 – Тупиковая очистная камерообразная горная выработка, образующаяся за счет расширения разрезной выработки, с указанием рабочего места горнорабочего**

Отгрузка горной массы производится ПДМ с помощью пульта дистанционного управления. Рабочим местом машиниста ПДМ в этом случае является сопряжение нарезной выработки с камерным пространством. Рабочее место проветривается исходящей из камерного пространства струей воздуха.

Для обеспечения безопасных условий труда машиниста погрузочно-доставочной машины концентрация газа на его рабочем месте не должна превышать предельно-допустимых значений. Анализ натуральных измерений, описанных в разделе 2.2, показывает, что при работе машин с ДВС в тупиковых горных выработках и подаче расчетного количества воздуха по фактору «проветривание от ДВС» наблюдаются превышения концентраций вредных компонентов выхлопных газов предельно-

допустимых значений, поэтому время работы машины по отгрузке руды из очистного пространства должно быть ограничено.

Таким образом, расчет требуемого количества воздуха для проветривания рабочей зоны по фактору разжижения вредных компонентов выхлопных газов ДВС остается тем же, что применяется на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель» (раздел 5.1.1). Дополнительно вводится ограничение на максимальное время работы машины по отгрузке руды из очистного пространства (раздел 5.1.2).

### 5.1.1 Расчет требуемого количества воздуха

В настоящее время в методиках расчета требуемого количества воздуха для проветривания горных выработок на рассмотренных рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель» для расчета требуемого расхода воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) по фактору разжижения вредных компонентов выхлопных газов машин с двигателями внутреннего сгорания используется следующая формула:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ДОП}}} \cdot g_{\text{ВЫХ}}, \quad (5.1)$$

где  $C_{\text{ВЫХ}}$  – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ ), % по объему;  $C_{\text{ДОП}}$  – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему для  $\text{CO}$  – 0,0017 %, для  $\text{NO}_x$  – 0,00026 %;  $g_{\text{ВЫХ}}$  – количество выхлопных газов после очистки,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Количество выхлопных газов  $g_{\text{ВЫХ}}$  определяется по данным технического паспорта машин по формуле для четырехтактного двигателя [65]:

$$g_{\text{ВЫХ}} = \frac{V \cdot n}{2}, \quad (5.2)$$

где  $V$  – суммарный рабочий объем цилиндров,  $\text{м}^3$ ;  $n$  – скорость вращения коленчатого вала, об/с (замеренная при отборе проб, или возможные максимальные обороты из технической характеристики двигателя).

Указанная формула позволяет произвести оценку максимально возможного выделения выхлопных газов на номинальных параметрах двигателя: учет полного объема цилиндров и максимальное число оборотов для номинальной мощности. Это обосновывается тем, что давление нагнетания (даже при использовании турбонаддува) в цилиндре ДВС варьируется от 0,5 до 1,5 бара, и масса воздуха, попадающего в цилиндр, близка к той, которую воздух занимает при давлении и температуре рудничной атмосферы. Исследования, проведенные на дизельных машинах, показывают, что включение турбонаддува лишь добавляет эффективный объем двигателя, не превышающий 35 % от объема цилиндров.



Масса топлива меньше массы воздуха на порядок, поэтому суммарная масса продуктов горения в цилиндре определяется преимущественно начальной массой воздуха. Отработавшие газы на выходе из выхлопной трубы принимают действующие там давление и температуру рудничной атмосферы. Исходя из вышеописанного, итоговый расход выхлопных газов определяется той массой воздуха, которая первоначально попала в цилиндры.

### 5.1.2 Расчет максимального времени работы машины по отгрузке руды из очистного пространства

Величину максимального времени работы машины по отгрузке руды из очистного пространства можно определить, если приравнять выражение (4.9) к предельно-допустимой концентрации газа ( $C_{\text{ПДК}}$ ) и прологарифмировать полученное выражение. Таким образом выражение для определения максимального времени работы (в секундах) погрузочно-доставочной машины в очистном пространстве камеры принимает следующий вид:

$$t_{\max} = -\frac{V}{Q} \cdot \ln\left(\frac{C_{\max} - C_{\text{ПДК}}}{C_{\max} - C_0}\right) \quad (5.3)$$

где  $V$  – проветриваемый объем камерного пространства,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q$  – количество воздуха, поступающего на проветривание,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $C_{\max}$  – максимально возможная концентрация газа (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ );  $C_{\text{ПДК}}$  – предельно-допустимая концентрация газа (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ );  $C_0$  – концентрация газа в поступающей на проветривание струе воздуха (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ ).

Исходя из выражения (5.3) видно, что при условии  $C_{\max} < C_{\text{ПДК}}$  (т.е. в рабочую зону подается количество воздуха большее, чем расчетное по фактору проветривания от газов машин с ДВС) время нахождения машины в пространстве очистной камеры не ограничено.

Выражение (5.3) справедливо при  $C_{\max} > C_{\text{ПДК}}$  и  $C_0 < C_{\text{ПДК}}$ , т.е. при увеличении концентрации газов при работающей машине в камерном пространстве. При  $C_0 > C_{\text{ПДК}}$  горные работы не осуществляются.

Исходя из симметрии законов увеличения и уменьшения концентрации газов в разрезной горной выработке для полного выноса газа из выработки время выезда машины должно быть не менее времени работы машины по отгрузке руды из очистного пространства ( $t_2 \geq t_1$ ).

### 5.1.3 Реализация разработанной методики в аналитическом комплексе «Аэросеть»

Разработанная методика расчета и организации проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок реализована в рамках модуля «расчет количества воздуха» для рудников Норникеля в аналитическом комплексе «Аэросеть». На рисунке 5.2 приведен пример окна ввода геометрических параметров камеры и параметров газовыделения на основе данных об используемой технике.

Двигатель внутреннего сгорания

Описание: Atlas Copco Scooptram ST 1030  
[Выбрать оборудование](#)

Мощность: 186000 Вт

Расход топлива: 198 г/кВт.ч

Начальный O<sub>2</sub>: 21 %

Выхлопные газы заданы на основе:  
Замеров

Суммарный рабочий объем цилиндров  
V: 8,9 л

Скорость вращения коленчатого вала  
n: 2000 об/мин

Концентрация на выхлопе  
CO: 0,2 %  
NO<sub>x</sub>: 0,08 %

Максимальное время пребывания  
T<sub>max</sub> = 297 с

Параметры проветривания

Начальная концентрация газа:  
CO: 0 %  
NO<sub>x</sub>: 0 %

Ширина камеры: 8 м

Высота камеры: 15 м

От трубопровода до места погрузки: 10 м

Рисунок 5.2 – Окно ввода и вывода параметров проветривания тупиковых камер

Окно программы (рисунок 5.2) в графе «Максимальное время пребывания» выводит максимально возможное время работы техники в камере с параметрами, указанными в окне, при условии подачи расчетного количества воздуха.

На рисунке 5.2 длина проветриваемого объема камерного пространства вводится в поле «От трубопровода до места погрузки». Это связано с тем, что за развалом формируется застойная зона, в которой могут существовать один или несколько вихрей с относительно малой интенсивностью переноса массы (раздел 4.1.3), таким образом проветриваемый объем формируется поперечным сечением камеры и расстоянием от вентиляционного трубопровода до места погрузки руды.

## **5.2 Регламентное обеспечение безопасности**

### **5.2.1 Обоснование безопасности**

Результаты настоящего исследования легли в основу научного обоснования возможности отступления от требований правил безопасности в части проветривания тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения (до 120 м<sup>2</sup>) длиной до 60 м, указанная величины длины камеры продиктована параметрами применяемой системы разработки на рудниках.

Разработаны Обоснования безопасности Опасного производственного объекта в соответствии с требованиями Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [70] и Федеральных Норм и Правил «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта» [69].

Отступления произведены от пункта 153 ФНиП [68]: «... *Вентиляция шахты должна быть организована так, чтобы пласты, горизонты, панели, блоки и камеры проветривались обособленно за счет общешахтной депрессии*» и от пункта 160 ФНиП [68]: «*Действующие выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха, за исключением тупиков длиной до 10 м, проветриваемых за счет диффузии*».

Обоснование безопасности должно содержать сведения о необходимости отступления от действующих норм и положения, компенсирующие эти отступления. В качестве обоснования отступлений должны быть использованы результаты исследований, а также результаты оценки риска. Таким образом, неотъемлемой частью Обоснования безопасности является оценка риска аварии на опасном производственном объекте, связанной с отступлением от требований правил безопасности. Существуют количественные и качественные методы оценки риска аварии. Требованиями Руководства по безопасности [57] при разработке научного обоснования отступления от требований правил опасности рекомендуется метод «Анализа опасностей и

работоспособности» (АОР). Метод АОР является качественным методом и предназначен для исследования опасностей отклонений технологических параметров и иных процедур от регламентных режимов. Однако, так как метод является качественным, он не позволяет определить снижение вероятности аварии при компенсировании отступления техническими средствами.

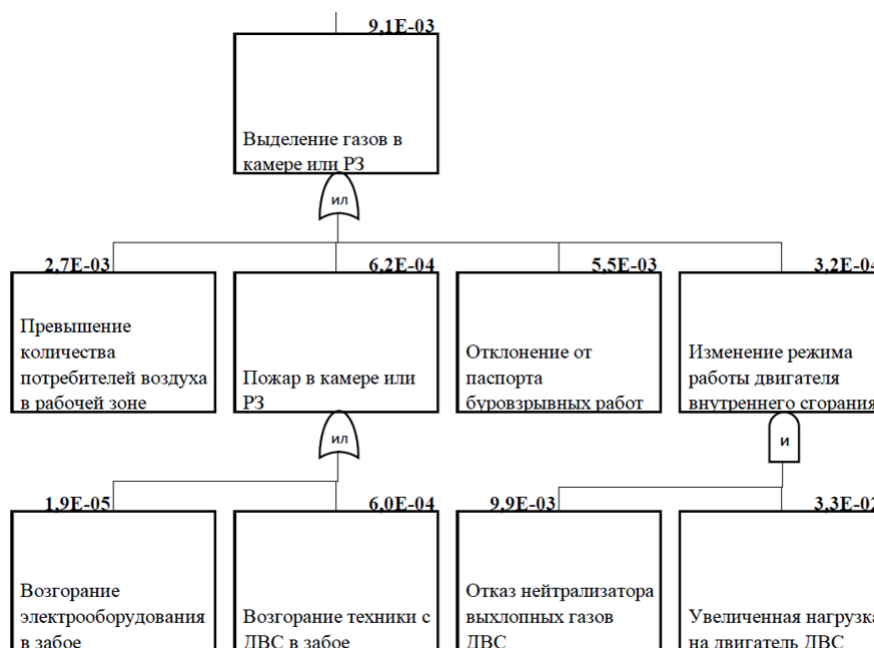
При разработке Обоснования безопасности использовался комплекс методов оценки риска. Начальным этапом оценки риска является, как и рекомендуется, метод АОР. Строится таблица, отражающая изменение технологического параметра, причину изменения, последствия, меры защиты, и, как итог, меру критичности. На данном производится оценка критичности изменения технологического параметра, и принимается решение о дальнейшем углубленном рассмотрении того или иного отклонения параметра от регламентных значений. Результат анализа риска аварии, рассматриваемой в обосновании безопасности, произведенный методом АОР приведен в таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Результат анализа риска аварии методом АОР**

| № п/п | Ключевое слово  | Причина   | Последствия  | Меры защиты  | Рекомендации  | Критичность    |
|-------|---|---|--|--|---|----------------|
| 1     | Концентрация ядовитых газов<br><b>ПРЕВЫШЕНИЕ</b>                            | Нарушение технологии проветривания, изменение параметров работы оборудования, режима работы машин с ДВС | <u>Безопасность:</u><br>авария, несчастный случай<br><br><u>Окружающая среда:</u><br>загрязнение, взрыв, разрушение<br><br><u>Эксплуатация:</u><br>простой, потери | Непрерывное использование приборов контроля рудничного воздуха   | Регламент проветривания, ПМЛЛПА, рабочие инструкции | <b>ВЫСОКАЯ</b> |
| 2     | Количество воздуха, подаваемое на проветривание камеры<br><b>НЕДОСТАТОК</b> | Нарушение схемы проветривания   | <u>Безопасность:</u><br>авария, несчастный случай<br><br><u>Окружающая среда:</u><br>загрязнение, взрыв, разрушение<br><br><u>Эксплуатация:</u> простой, потери    | Организационные мероприятия по контролю параметров проветривания | Регламент проветривания, ПМЛЛПА, рабочие инструкции | <b>ВЫСОКАЯ</b> |
| 3     | Количество воздуха, подаваемое на проветривание камеры<br><b>ПРЕВЫШЕНИЕ</b> | Нарушение схемы проветривания   | <u>Безопасность:</u> -<br><br><u>Окружающая среда:</u> -<br><br><u>Эксплуатация:</u> -   | Организационные мероприятия по контролю параметров проветривания | Регламент проветривания                             | <b>НИЗКАЯ</b>  |

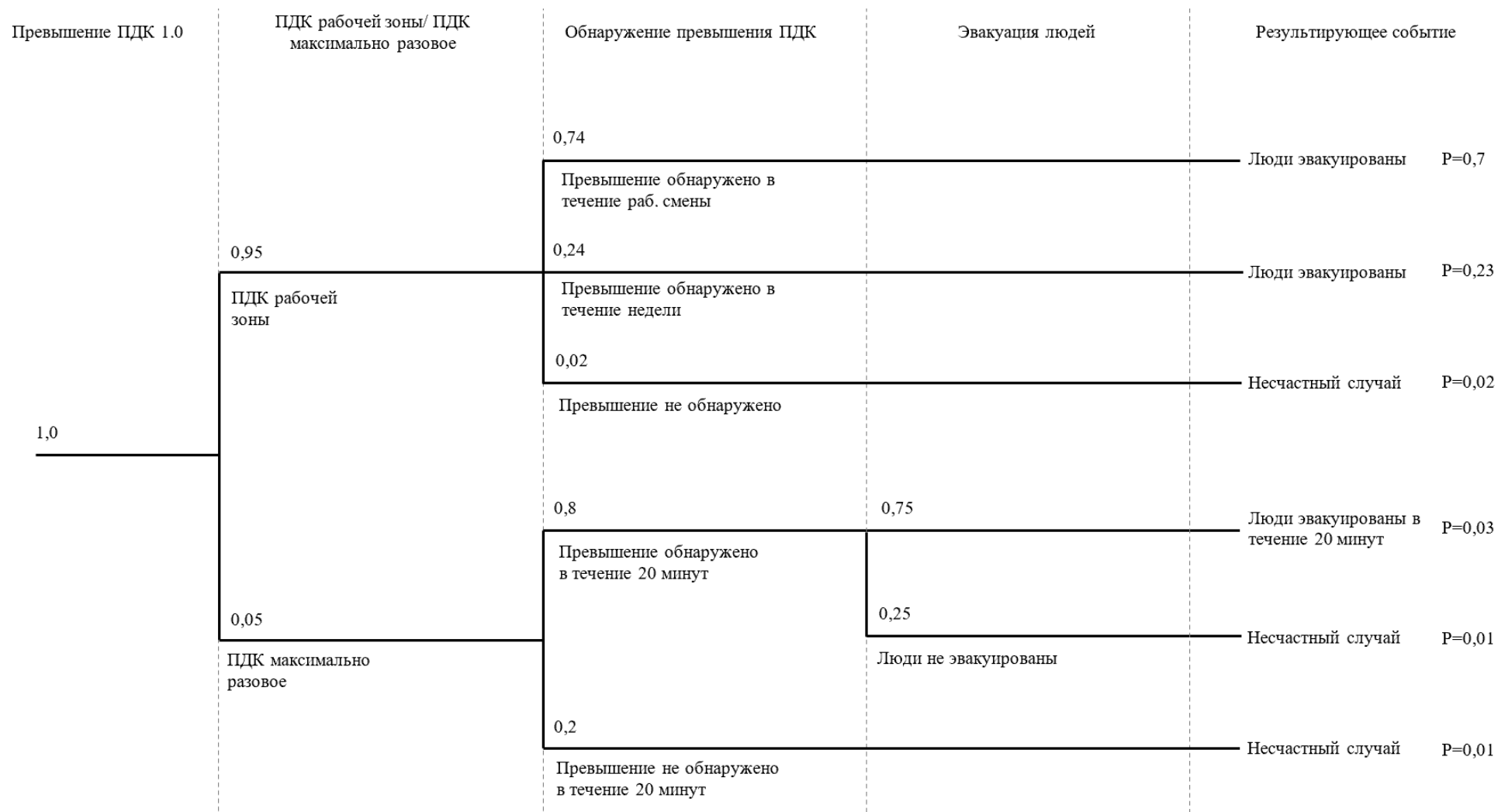
Следующим этапом является использование метода «Анализ деревьев отказов» (АДО) с целью количественной оценки частоты возникновения нежелательного события. Метод АДО используется для анализа возможных причин возникновения нежелательного события при оценке технологических процессов и далее расчета его частоты на основе знания частот исходных событий. Проветривание горных выработок является технологическим процессом, поэтому выбран метод АДО.

Структура дерева отказов включает одно головное событие, которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибки, отказы, неблагоприятные внешние воздействия), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в "узлах" деревьев используются знаки "И" и "ИЛИ". Логический знак "И" означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий. Знак "ИЛИ" означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий. Таким образом, нежелательное событие раскрывается в виде дерева до простейших событий и ошибок персонала. Фрагмент дерева отказов приведен на рисунке 5.3.



**Рисунок 5.3 – Фрагмент дерева отказов**

Следующим этапом является интеграция полученной частоты нежелательного события с результатами метода «Анализ дерева событий» (АДС). Метод АДС включает построение последовательности событий, исходящих из основного события. Метод АДС используется для анализа развития аварийной ситуации и оценки частоты ее возникновения. Дерево событий, построенное при разработке Обоснования безопасности, приведено на рисунке 5.4.



**Рисунок 5.4 – Дерево событий**

Дальнейшим этапом производится оценка приемлемости риска аварии с использованием матрицы «частота – тяжесть последствий», используемой в методе «Анализа вида, последствий и критичности отказов» (АВПКО). Результатом метода АВПКО является вывод о приемлемости/неприемлемости риска аварии.

При разработке Обоснования безопасности производится оценка риска аварий до введения отступления и после введения отступления. В случае неприемлемости риска аварии вводятся дополнительные меры безопасности.

С целью анализа уровня снижения итоговой вероятности возникновения аварии при применении дополнительных мер безопасности использует метод «Анализа мер безопасности» (АМБ). Метод АМБ базируется на построении «дерева отказов» с применяемыми компенсирующими мероприятиями. Фрагмент дерева отказов с барьерами безопасности приведен на рисунке 5.5.



**Рисунок 5.5 – Фрагмент дерева отказов при методе АМБ**

Таким образом, комбинируя указанные методы оценки риска аварии, произведена оценка влияния на безопасность ведения горных работ при отступлении от правил безопасности с учетом внедрения компенсирующих мероприятий. Риск возникновения аварии, а именно отравление ядовитыми газами, был снижен за счет внедрения дополнительных мер безопасности.

Обоснование безопасности для подземного рудника «Таймырский» разработано в 2018 году. Для остальных четырех рудников Талнахского рудного узла: «Комсомольский», «Маяк», «Октябрьский», «Скалистый» Обоснования безопасности разработаны в 2020 году. Для обеспечения безопасности при отступлениях от требований правил безопасности разработаны следующие компенсирующие мероприятия (барьеры безопасности):

1. Ввод в действие «Методики расчета требуемого количества воздуха для проветривания протяженных тупиковых очистных горных выработок большого



сечения при работе погрузочно-доставочных машин на дистанционном управлении», 2021 г.

В рамках требований данной методики предусмотрены следующие действия при эксплуатации существующих горизонтов или вводе в эксплуатацию новых горизонтов проектной или эксплуатирующей организацией:

- производить расчет требуемого количества воздуха для проветривания протяженных тупиковых очистных горных выработок большого сечения;
  - определять требуемую производительность ВМП;
  - осуществлять выбор вентилятора местного проветривания;
  - производить расчеты максимального времени нахождения ПДМ с двигателем внутреннего сгорания в пространстве очистной камеры и минимального времени выезда ПДМ в выработку со сквозным проветриванием свежей струей воздуха согласно «Методике...». Максимальное время нахождения ПДМ с двигателем внутреннего сгорания в пространстве очистной камеры ограничено 5 минутами.
2. Оборудование автоматической замерной станцией рабочей зоны горнорабочего с пультом ДУ ПДМ при производстве отгрузки взорванной руды из пространства очистной камеры.

При эксплуатации существующих горизонтов в процессе отгрузки взорванной руды из пространства очистной камеры рабочая зона машиниста ПДМ оборудована автоматической замерной станцией (АЗС), позволяющей производить измерение состава рудничной атмосферы на предмет количественной оценки ядовитых газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_2$ ). Контролируемые параметры концентраций горючих и ядовитых газов в устье тупиковых камерообразных горных выработок выводятся на пульт горного диспетчера рудника. АЗС в свою очередь при обнаружении превышения ПДК ядовитых газов в рудничной атмосфере – сигнализирует об этом. Машинист ПДМ обязан прекратить процесс погрузки и выйти в выработку со сквозным проветриванием. Процесс погрузки взорванной рудной массы может быть продолжен после выключения сигнализации АЗС о превышении ПДК.

На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные Обоснования безопасности внесены в реестр Ростехнадзора.

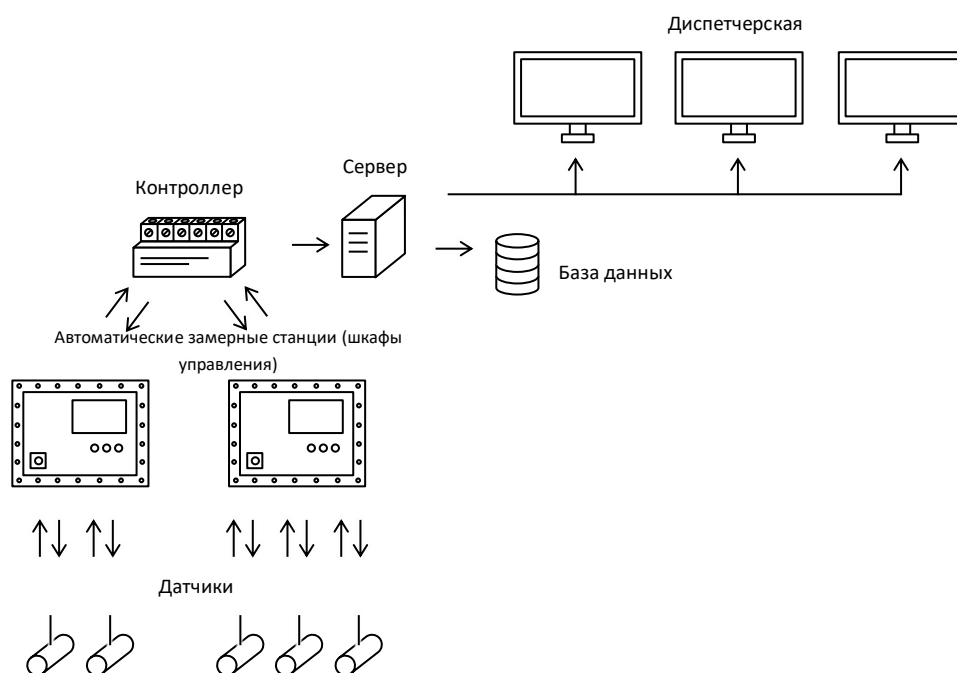
### **5.2.2 Автоматическая замерная станция**

Основным компенсирующим мероприятием, снижающим риск возникновения аварии, связанной с превышением предельно-допустимой концентрацией в рабочей

зоне, является оборудование рабочей зоны автоматизированной замерной станцией. Автоматическая замерная станция (АЗС) выполняет следующие функции:

- контроль содержания кислорода и ядовитых газов, выделяющихся при работе техники с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) в рабочих зонах;
- сбор и передачу информации с датчиков в базу данных и горному диспетчеру;
- сигнализация о превышении предельно допустимой концентрации ядовитых газов и снижении содержания кислорода ниже 20% по объему.

На рисунке 5.6 представлена схема взаимодействия структурных элементов АЗС.



**Рисунок 5.6 – Схема взаимодействия структурных элементов АЗС**

АЗС состоит из следующих структурных элементов:

- цифровые датчики концентрации CO, NO, NO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>;
- шкаф управления АЗС;
- местная сигнализация о превышении концентрации ядовитых газов выше ПДК и/или снижении концентрации кислорода ниже 20% по объему;
- контроллер, обрабатывающий показания датчиков концентраций;
- каналы передачи данных;
- сервер для обработки полученных данных;
- база данных для хранения показаний датчиков.

Контролируемыми параметрами являются концентрация CO, NO, NO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>.

Структурные элементы АЗС взаимодействуют следующим образом. Данные о концентрации CO, NO, NO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в устьях тупиковых выработок передаются по каналам

связи от датчиков к АЗС. АЗС преобразует цифровую информацию с датчиков и передает через контроллер на сервер. С сервера информация передается на пульт диспетчера и сохраняется в базе данных, чтобы при необходимости отобразить динамику концентрации контролируемых газов в тупиковых выработках.

Система мониторинга АЗС обеспечивает возможность отдельной установки входящих в ее состав агрегатов в зависимости от расположения существующего оборудования электроснабжения, а также возможность повторного монтажа и переноса оборудования в другие горные выработки.

Электрооборудование и датчики АЗС выполнены в рудничном взрывозащищенном исполнении с уровнем взрывозащиты не ниже РВ. Во всех вариантах исполнения блоков управления применяются искробезопасные цепи управления не ниже  $ib$ . Степень защиты корпуса от внешних воздействий не ниже IP 54. Напряжение для питания модулей и блоков управления и защиты стабилизировано, с отклонением от номинального в пределах  $\pm 5\%$ . Предусмотрена автономная работа оборудования АЗС и блоков передачи данных в течение 60 минут в случае отключения электропитания.

Обмен данными с АЗС осуществляется через беспроводной канал связи или проводной канал SHDSL, физическая среда – телефонный кабель с дальностью магистральной линии до 5 км. В базе данных хранится название выработки, где расположены датчики, время замеров, значения измеренных концентраций ядовитых газов и кислорода. Запись производится каждую секунду.

Единая АЗС в настоящий момент реализована. Ведется проектирование системы мониторинга с использованием нескольких АЗС на руднике «Таймырский» и разрабатывается рабочая документация на систему мониторинга.

### **5.2.3 Регламент технологических производственных процессов**

Разработанные методики расчета и организации проветривания и обоснования безопасности отражены в Регламенте технологических производственных процессов по вентиляции подземных рудников ОАО «ГМК «Норильский никель». Результаты работы отражены в следующих разделах регламента: «Меры по организации проветривания тупиковых камер», «Меры по обеспечению безопасной эксплуатации машин с ДВС». Результаты настоящей работы позволяют осуществлять добычу тупиковыми камерами длиной до 60 м.

### **Меры по организации проветривания тупиковых камер**

Регламентом устанавливаются требования для проветривания нарезной выработки тупиковой очистной камеры с размещенным в ней рабочим местом горнорабочего (рисунок 5.1). Проветривание осуществляется с использованием ВМП, тогда как камерное пространство длиной до 60 м, куда доступ горнорабочих запрещен, проветривается струей воздуха, выходящей из вентиляционного трубопровода, т.е. за счет диффузии. Величина отставания вентиляционного трубопровода от границы камерного пространства не превышает 10 м.

Данные требования распространяются на рабочие зоны горизонтальных и наклонных протяженных (более 10 м) тупиковых очистных камер при производстве отгрузки взорванной рудной массы погрузочно-доставочной машиной с двигателем внутреннего сгорания, проветривании после взрывных работ, бурении и других производственных процессах, производимых в рабочей зоне тупиковой очистной камеры. Рабочей зоной тупиковой очистной камеры является часть нарезной (подготовительной) выработки, примыкающая к устью тупиковой очистной камеры.

Определение требуемого количества воздуха и производительности ВМП при проветривании тупиковых очистных камер производится согласно «Методике расчета требуемого количества воздуха ...», представленной в разделе 5.1, при этом максимальное время нахождения ПДМ в пространстве очистной камеры определяется согласно формулам, представленным в разделе 5.1.1. При этом минимальное, но достаточное время для частичного разжижения вредных компонентов выхлопных газов ПДМ, на которое ПДМ выезжает из очистной камеры в сквозную выработку, проветриваемую свежей струей воздуха, составляет 1 минуту.

### **Меры по обеспечению безопасной работы машин с ДВС в рабочих зонах тупиковых камер**

Рабочая зона машин с ДВС должна быть оборудована автоматической замерной станцией (АЗС), позволяющей производить измерение состава рудничной атмосферы на предмет количественной оценки ядовитых газов (СО, NO, NO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>) и содержания кислорода в процессе отгрузки взорванной руды. Контролируемые параметры концентраций ядовитых газов в устье тупиковых очистных или подготовительных горных выработок выводятся на пульт горного диспетчера рудника. АЗС в свою очередь при обнаружении превышения ПДК ядовитых газов в рудничной атмосфере сигнализирует о превышении ПДК ядовитых газов, либо о снижении концентрации кислорода ниже 20% по объему. Машинист ПДМ обязан прекратить процесс погрузки и

выйти в выработку со сквозным проветриванием. Процесс погрузки взорванной рудной массы может быть продолжен после уменьшения концентрации ядовитых газов ниже ПДК и восстановления концентрации кислорода выше 20% по объему.

### **5.3 Экономический эффект применения результатов работы**

Оценка экономической эффективности внедрения результатов исследования строится на оптимизации параметров систем разработки, применяемых на рудниках Талнахского рудного узла. Оптимизация параметров системы разработки заключается в снижении объемов подготовительных выработок в связи с переводом очистных выработок в разряд тупиковых, а также увеличением их длины. Анализ применяемых систем разработки приведен в разделе 1.1.

В настоящее время с учетом требований нормативных документов [68] длина тупиковых камер ограничена 10 м. Разработанные Обоснования безопасности позволяют изменить длину тупиковых камер до 60 м. Оптимизация системы разработки заключается в переходе от сквозных камер или слоев к тупиковым при длинах до 60 м, что позволяет отказаться от проходки дополнительных горных выработок. В таблице 5.2 приведены горизонтальные (наклонные) горные выработки (и их суммарный объем), от проходки которых позволяет отказаться применение результатов исследования в части применения тупиковых очистных выработок длиной 60 м. При анализе не учтены вертикальные горные выработки, т.к. их длина зависит от дальности расположения очистных работ от вентиляционного горизонта. С целью определения объема выработок выбрано типовое сечение подготовительных выработок минимальное для проезда техники – 20,4 м<sup>2</sup>.

Таблица 5.2 – Сводная таблица потенциального снижения объемов проводимых выработок при применении результатов исследования в части применения тупиковых очистных выработок длиной 60 м

| Система разработки                                    | Количество выемочных единиц | Название выработки  | Количество выработок | Суммарная длина выработок | Сечение             | Общий объем исключаемых выработок |
|---|-----------------------------|---|----------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Сплошная с фланговыми уклонами                        | 12                          | Слоевой орт по границе панели                             | 2 шт.                | 96                        | 20,4 м <sup>2</sup> | 1 958 м <sup>3</sup>              |
| Сплошная с уклонами по почве рудного тела             | 12                          | Транспортной штрек по границе панели                      | 2 шт.                | 96                        | 20,4 м <sup>2</sup> | 4 896 м <sup>3</sup>              |
|   |                             | Слоевой заезд по границе панели                           | 2 шт.                | 96                        | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
|   |                             | Вентиляционный орт  | 1 шт.                | 48                        | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
| Сплошная с транспортными штреками                     | 12                          | Слоевой заезд по границе панели                           | 2 шт.                | 96                        | 20,4 м <sup>2</sup> | 1 958 м <sup>3</sup>              |
| Камерная при отработке вкрапленных руд                | 60                          | Соединительный штрек по границе выемочного участка        | 3 шт.                | 360 м                     | 20,4 м <sup>2</sup> | 61 730 м <sup>3</sup>             |
|   |                             | Верхний соединительный штрек по центру выемочного участка | 1 шт.                | 120 м                     | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
|   |                             | Слоевой орт   | 8 шт.                | 536 м                     | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
|   |                             | Верхний разрезной штрек верхнего подэтажа                 | 30 шт.               | 2 010 м                   | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
| Камерно-целиковая при отработке руд мощностью до 20 м | 10                          | Панельный орт по кровле рудного тела                      | 2 шт.                | 160 м                     | 20,4 м <sup>2</sup> | 17 136 м <sup>3</sup>             |
|   |                             | Панельный орт по почве рудного тела                       | 1 шт.                | 80 м                      | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |
|   |                             | Вентиляционный штрек                                      | 10 шт.               | 600 м                     | 20,4 м <sup>2</sup> |                                   |

| <b>Система разработки</b>  | <b>Количество<br/>выемочных<br/>единиц</b> | <b>Название выработки</b>                             | <b>Количество<br/>выработок</b> | <b>Суммарная<br/>длина<br/>выработок</b> | <b>Сечение</b>      | <b>Общий объем<br/>исключаемых<br/>выработок</b> |
|--|--|---|---------------------------------|--|---------------------|--|
| Камерно-целиковая при<br>отработке руд мощностью<br>более 20 м при двух<br>подэтажах | 20   | Вентиляционный орт                                    | 2 шт.                           | 160 м                                    | 20,4 м <sup>2</sup> | 18 768 м <sup>3</sup>                            |
|  |  | Слоевой орт I подэтажа в конце<br>очистной выработки  | 1 шт.                           | 80 м                                     | 20,4 м <sup>2</sup> |  |
|  |  | Слоевой орт II подэтажа в конце<br>очистной выработки | 1 шт.                           | 80 м                                     | 20,4 м <sup>2</sup> |  |
|  |  | Вентиляционный штрек                                  | 10 шт.                          | 600 м                                    | 20,4 м <sup>2</sup> |  |
| Камерная при отработке<br>целиков  | 2  | Верхний разрезной штрек                               | 2 шт.                           | 120 м                                    | 20,4 м <sup>2</sup> | 2 448 м <sup>3</sup>                             |

Таким образом, исходя из таблицы 5.2 можно определить удельное снижение объема проводимых выработок при переходе к тупиковым камерам длиной 60 м на одну выемочную единицу, а также определить экономию на проходке. С целью определения экономии введена средняя стоимость проходки м<sup>3</sup> горной выработки, она составляет 70 тыс. руб. В таблице 5.3 приведены результаты определения удельной экономической эффективности оптимизации системы разработки на одну выемочную единицу.

Помимо финансовой экономии за счет снижения объема проводимых выработок, также увеличивается потенциальное количество выемочных единиц за счет сокращения времени подготовки, в случае технической и технологической возможности.



Таблица 5.3 – Определение удельной экономической эффективности оптимизации системы разработки на одну выемочную единицу

| <b>Система разработки</b>   | <b>Количество выемочных единиц</b> | <b>Общий объем проходки</b> | <b>Общий объем исключаемых выработок</b> | <b>Удельный объем исключаемых выработок на выемочную единицу</b> | <b>Удельная экономия на проходке на выемочную единицу</b> | <b>Процент снижения проводимых выработок</b> |
|---|------------------------------------|-----------------------------|--|--|---|--|
| Сплошная с фланговыми уклонами  | 12                                 | 5 386 м <sup>3</sup>        | 1 958 м <sup>3</sup>                     | 163,2 м <sup>3</sup>   | 11 424 тыс. руб.  | 36%  |
| Сплошная с уклонами по почве рудного тела                                   | 12                                 | 7 344 м <sup>3</sup>        | 4 896 м <sup>3</sup>                     | 408,0 м <sup>3</sup>   | 28 560 тыс. руб.  | 66%  |
| Сплошная с транспортными штреками   | 12                                 | 5 386 м <sup>3</sup>        | 1 958 м <sup>3</sup>                     | 163,2 м <sup>3</sup>   | 11 424 тыс. руб.  | 36%  |
| Камерная при отработке вкрапленных руд                                      | 60                                 | 144 310 м <sup>3</sup>      | 61 730 м <sup>3</sup>                    | 1 028,9 м <sup>3</sup>   | 72 035 тыс. руб.  | 43%  |
| Камерно-целиковая при отработке руд мощностью до 20 м                       | 10                                 | 31 008 м <sup>3</sup>       | 17 136 м <sup>3</sup>                    | 1 713,6 м <sup>3</sup>   | 119 952 тыс. руб.   | 55%  |
| Камерно-целиковая при отработке руд мощностью более 20 м при двух подэтажах | 20                                 | 46 512 м <sup>3</sup>       | 18 768 м <sup>3</sup>                    | 938,4 м <sup>3</sup>   | 65 688 тыс. руб.  | 40%  |
| Камерная при отработке целиков  | 2                                  | 4 896 м <sup>3</sup>        | 2 448 м <sup>3</sup>                     | 1 224,0 м <sup>3</sup>   | 85 680 тыс. руб.  | 50%  |

#### 5.4 Выводы по главе

Исследования, проведенные в настоящей работе, позволяют применять в качестве очистных выработок тупиковые камеры длиной до 60 м. Для перевода очистных выработок в разряд тупиковых на ПАО «ГМК «Норильский никель» осуществлены следующие мероприятия:

- Разработана и внедрена в АК «Аэросеть» методика расчета и организации проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок, позволяющая рассчитывать безопасное время работы машиниста ПДМ на пульте дистанционного управления при отгрузке руды из очистного пространства камеры в атмосфере с содержанием газов, не превышающем предельно-допустимых значений.
- Разработаны Обоснования безопасности опасных производственных объектов ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Основным компенсирующим мероприятием, снижающим риск возникновения аварии, связанной с превышением предельно-допустимой концентрацией в рабочей зоне, является оборудование рабочей зоны автоматизированной замерной станцией.
- Получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности на разработанные Обоснования безопасности опасных производственных объектов.
- Заключение промышленной безопасности внесены в реестр заключений Ростехнадзора.
- Произведена корректировка РТПП в части возможности увеличения длины тупиковых камер до 60 м.

Произведена оценка экономической эффективности оптимизации применяемых систем разработки в части применения тупиковых камер до 60 м. Основные выводы по экономической оценке:

- Процент снижения проводимых выработок по применяемым на объекте системам разработки составляет от 36% до 66%.
- Удельная экономия на проходке на выемочную единицу при стоимости м<sup>3</sup> проведения выработки 70 тыс. руб. составляет от 11 до 120 млн. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-практической задачи разработки методики проветривания очистных тупиковых камерообразных горных выработок большого сечения, образующихся за счет расширения подготовительной нарезной выработки, во время производства процесса отгрузки взорванной горной массы из очистной выработки самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания и получены следующие основные научные результаты:

1. Проведено исследование процессов газовыделений самоходного горно-шахтного оборудования с двигателями внутреннего сгорания в условиях рудников ПАО «ГМК «Норильский никель».
2. Разработана и параметризирована математическая модель проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы самоходным горно-шахтным оборудованием с двигателями внутреннего сгорания.
3. Проведено многопараметрическое численное моделирование процесса проветривания очистных тупиковых выработок большого сечения при производстве отгрузки взорванной горной массы.
4. Осуществлена корректировка аналитической модели выноса газов в тупиковой выработке с учетом камерного пространства, позволяющей определять максимальное время работы погрузочно-доставочной машины в очистном пространстве.
5. Разработана методика расчета и организации проветривания протяженных тупиковых очистных камер, внедренная на рудниках Талнахского рудного узла ПАО «ГМК «Норильский никель».
6. Разработаны Обоснования безопасности опасных производственных объектов ПАО «ГМК «Норильский никель». На разработанные Обоснования безопасности получены положительные заключения экспертизы промышленной безопасности. Указанные заключения внесены в реестр заключений Ростехнадзора.
7. Результаты работы включены в Регламент технологических производственных процессов «Проветривание горных выработок в подземных условиях подразделений ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».
8. Приведена оценка экономической эффективности внедрения результатов исследования засчет оптимизации параметров систем разработки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Амосов П.В. Результаты численного моделирования аэродинамики тупиковых выработок при беструбном способе проветривания // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – Т.2. С. 114-117.
- 2 Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Том 1. Анализ парадигмы / Венгеров И.Р. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 631 с.
- 3 Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
- 4 Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.: ил.
- 5 ГОСТ Р 55153–2012 Оборудование горно-шахтное. Машины погрузочно-доставочные. Требования безопасности и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014 – 27 с.
- 6 Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляции в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. – 2020. – Т.20, №3. – С.280–290. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.8
- 7 Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы планирования эксперимента). М.: Мир, 1981. – с. 448.
- 8 Дипломное проектирование: учеб. Пособие / М.С. Скачков, Б.П. Бадтиева, А.Н. Ламзин, Б.Ф. Федоренко. – Норильск: НИИ, 2007. – 266 с.
- 9 Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дисс. ... д-р. техн. наук. – Пермь, 2019. – 247 с.
- 10 Казаков Б.П., Шалимов А.В., Левин Л.Ю. Проветривание выработок большого сечения с помощью вентиляторных установок, работающих без перемычки // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2010. – № 2. С. 89-97.
- 11 Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С. О возможности проветривания тупиковых выработок беструбным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №9. С. 195-199.
- 12 Казаков Б.П., Шалимов А.В., Исаевич А.Г. Адвективное проветривание тупиковой выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №S7. С. 76-82.
- 13 Казаков Б.П., Семин М.А., Мальцев С.В. Математическое моделирование проветривания панелей гипсовой шахты эжекторными установками // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2018. – № 3. С. 245-255.
- 14 Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование динамики теплового режима тупиковых горных выработок с источником выделения теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 6. 113–120
- 15 Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 5-33. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_5
- 16 Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Моделирование процессов вентиляции шахт для обеспечения метанобезопасности горных работ // Горный журнал. – 2011. – № 7. – С. 101-103.

- 17 Каледина Н.О., Кобылкин А.С., Кобылкин С.С. Моделирование пульсирующего проветривания горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S7. С. 449-453.
- 18 Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Системное проектирование вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S1. – С. 282-293.
- 19 Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Объемное моделирование как метод исследования и управления термо- и аэрогазодинамическими процессами на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 1. – С. 149-156.
- 20 Каледина Н.О. Кобылкин С.С. О выборе способа проветривания тупиковых горных выработок газообильных угольных шахт // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 99-103.
- 21 Качурин Н.М., Стась Г.В., Мохначук И.И., Поздеев А.А. Аэрогазодинамика очистных участков шахт и рудников // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: сб. трудов конференции. – Пермь, 2014. – С. 381-386.
- 22 Качурин Н.М., Левин А.Д., Ботов Ф.М. Аэрогазодинамические процессы при строительстве тоннелей большого сечения // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2015. – № 1. С. 46-55.
- 23 Качурин Н.М., Воробьев С.А., Левин А.Д., Ботов Ф.М. Моделирование аэрогазодинамических процессов при проветривании выработок большого сечения // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2015. – № 1. С. 56-64.
- 24 Качурин Н.М., Левин А.Д., Ефимов В.И., Воробьев С.А. Моделирование движения воздуха в рудниках // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 11. С. 56-60.
- 25 Клишкань А.Ф. Исследование метановыделения и разработка метода расчета проветривания подготовительных выработок шахт Донбасса при взрывном способе выемки угля: дисс. ... канд. техн. наук. – Макеевка; Донбасс, 1968. – 130 с.
- 26 Кобылкин А.С. Исследование распределения вредных газов в горных выработках с использованием компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. С. 202-207.
- 27 Кобылкин С.С., Каледина Н.О., Кобылкин А.С., Сенаторов В.А. Динамика выхлопных газов от дизельных машин в рудниках // Горный журнал. – 2023. – № 12. С. 94-102. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.15
- 28 Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. С. 79-84.
- 29 Козырев С.А., Амосов П.В. Исследование процесса проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения // Известия вузов. Горный журнал. – 2018. – № 8. С. 125-134.
- 30 Колесов Е.В. Обоснование последовательного проветривания рабочих зон нескольких тупиковых выработок // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 291-295. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.78

- 31 Коршунов Г. И., Еремеева А. М., Серегин А. С. Обоснование снижения требуемого расхода воздуха при проветривании горных выработок угольных шахт с работающими дизельными двигателями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 47–59. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_47.
- 32 Красноштейн А.Е. Научные основы процессов формирования и нормализации аэрозольного и газового состава атмосферы калийных рудников. – Автореф.... д.т.н.. – Л.: ЛГИ, 1977. – 47 с.
- 33 Кременчуцкий Н.Ф. Проветривание угольных шахт / Н.Ф. Кременчуцкий. - М. : ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1961. - 240 с.
- 34 Кузьминых Е.Г., Кормщиков Д.С. Анализ методов расчета требуемого количества воздуха для разжижения отработанных выхлопных газов / Горное эхо. № 3 (80) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – С. 120-123. DOI: 10.7242/echo.2020.3.21
- 35 Лайгна К.Ю. Математическое моделирование диффузионных процессов вентиляции штреко- и камерообразных выработок, т. 1. – Таллин: Изд-во ВЦ НИИС ГОССТРОЯ ЭССР, 1979. – 231 с.
- 36 Лайгна К.Ю. Расчет конвективно-диффузионного переноса газообразных примесей в горных выработках сланцевых шахт ЭССР. – Таллин: Валгус, 1982. – 156 с.
- 37 Лайгна К.Ю., Суллакатко О.А. Распространение примесей в горных выработках шахт и в атмосфере сланцевого бассейна ЭССР. – Таллин: Эстонский НИИ научно-техн. информ. и технико-экономич. исслед., 1984. – 52 с.
- 38 Лайгна К.Ю., Блюм М.Ф., Виирлайд А.Х. Турбулентная диффузия в стратифицированных потоках подземных выработок. – ФТПРПИ, 1988, № 1, с. 96-98.
- 39 Лайгна К.Ю., Поттер Э.А. Турбулентное струйное течение воздуха в сквозных выработках. – ФТПРПИ, 1989, № 3, с. 91-101.
- 40 Левин Л.Ю., Исаевич А.Г., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. – 2015. – № 1. С. 72-75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13
- 41 Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46-57. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.
- 42 Медведев И.И. Проветривание калийных рудников. – М.: Недра, 1970. – 207 с.
- 43 Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 251 с.:ил.
- 44 Методика измерений расхода воздуха в подземных горных выработках при проведении воздушно депрессионных съемок. – Пермь, 2020 – с. 22.
- 45 Накаряков Е.В. Анализ влияния геометрических параметров поперечного сечения очистной тупиковой камеры на эффективность ее проветривания // Горное эхо. Т. 76. № 3 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2019. – С. 76-79. DOI: 10.7242/echo.2019.3.21
- 46 Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания // Горное эхо. № 3 (80) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – С. 120-123. DOI: 10.7242/echo.2020.3.23

47 Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателем внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 5. С. 41-47. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47

48 Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. № 4 (85) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2021. – С. 113-118. DOI: 10.7242/echo.2021.4.22

49 Накаряков Е.В. Исследование качественного состава рудничной атмосферы тупиковой горной выработки при отгрузке руды техникой с двигателем внутреннего сгорания // Горное эхо. № 2 (87) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2022. – С. 119-122. DOI: 10.7242/echo.2022.2.19

50 Накаряков, Е.В. Исследование влияния тепловыделений техники с ДВС на проветривание тупиковых камерообразных выработок // Горное эхо. № 2 (91) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2023. – С. 110–115. DOI: 10.7242/echo.2023.2.19

51 Павлов С.А. Исследование способа проветривания протяженных тупиковых выработок с применением продольных перегородок // Сборник материалов конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. №4.» – С. 22-31. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-22-31

52 Прутас В.П., Мальцев С.В., Бублик С.А., Суханов А.Е. Исследование динамики воздушных потоков в вентиляционном канале главной вентиляторной установки для определения места размещения средств фиксации расходов воздуха // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей : Материалы II Международной научно-практической конференции, Пермь, 21–22 октября 2021 года / Под научной редакцией Г.З. Файнбурга, Н.А. Литвиновской. – Пермь: ПНИПУ, 2021. – С. 231-241.

53 Пьянников В. П. Повышение эффективности проветривания тупиковых горных выработок при работе погрузочно-доставочных (транспортных) машин с двигателями внутреннего сгорания: дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2005. – 198 с.

54 Росляков А.С., Исаков В.А., Ковалев В.И. Исследование газовой динамики в призабойной зоне тупиковой выработки при производстве погрузочно-доставочных работ // Известия высших учебных заведений. Горный журнал №3 / УГГУ. – Екатеринбург, 2011. – С. 15-18.

55 Росляков А.С., Исаков В.А. Проветривание призабойной зоны тупиковой горной выработки двумя последовательными свободными струями // Известия высших учебных заведений. Горный журнал №5 / УГГУ. – Екатеринбург, 2011. – С. 57-62.

56 Росляков А.С. Оптимизация проветривания тупиковой выработки при работе в ней машин с двигателем внутреннего сгорания: дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2012. – 172 с.

57 Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.11.2022 № 387

58 Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания", утверждены приказом Главного государственного санитарного врача от 28 января 2021 г. № 2.

- 59 Скочинский А.А. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. М., Л.: Углетехиздат, 1949. – 443 с.
- 60 Скочинский А.А. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. – М.: Углетехиздат, 1959. – 632с.
- 61 Снегирёв А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
- 62 Соколов Э.М. Углекислый газ в угольных шахтах / Соколов Э.М., Качурин Н.М. – М.: Недра, 1987. – 142 с.: ил.
- 63 Справочник по рудничной вентиляции / под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1977. – 328 с.: ил.
- 64 Ушаков К.З. Рудничная аэрология / Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. – М.: Недра, 1978. – 440 с.: ил.
- 65 Ушаков К.З. Рудничная вентиляция: Справочник / Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. - 439 с.
- 66 Файнбург Г.З., Семин М.А., Исаевич А.Г. Взаимосвязь физических механизмов, математических моделей и технических способов проветривания тупиковых горных выработок / Горное эхо. № 3 (80) / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – С. 131-137. DOI: 10.7242/echo.2020.3.25
- 67 Файнбург Г.З., Исаевич А.Г. Анализ микроциркуляционных потоков между микрозонами в забое тупиковых комбайновых выработок калийных рудников при различных способах проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 58–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-58-73.
- 68 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 № 505
- 69 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта»: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.07.2013 № 306 (с изменениями, утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.07.2018 № 298)
- 70 Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 29.12.2022) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»
- 71 Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. – М.: Изд-во МФТИ: 2011 – с. 45.
- 72 Aminasadati, S.M.; Hooman, K. Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings. In Proceedings of the 12th North American Mine Ventilation Symposium, Sparks, NV, USA, 9–11 June 2008; pp. 253–259.
- 73 ANSYS CFX Theory Guide. Release 2021 R2. ANSYS, Inc., 2021.
- 74 Bakker A. The colorful fluid mixing gallery. 2008. Available at: <http://www.bakker.org/cfm> (accessed 15 July 2021).
- 75 Balusu, R.; Tuffs, N.; Peace, R.; Xue, S. Longwall goaf gas drainage and control strategies for highly gassy mines. In Proceedings of the 8th International Mine Ventilation Congress, Brisbane, Australia, 6–8 July 2005.



- 76 Blazek J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. 3d ed. Elsevier Science, San Diego, CA, 2015. 466 p.
- 77 Branny, M. Computer simulation of flow of air and methane mixture in the longwall-return crossing zone. *Arch. Min. Sci.* 2006, 51, 133–145.
- 78 Brodny, J. Determination of the zone endangered by methane explosion in goaf with caving of operating longwalls. In *Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, Albena, Bulgaria, 30 June–6 July 2016; Volume 2, pp. 299–306. DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S03.039
- 79 Brodny, J.; Tutak, M. Analysis of Methane Hazard Conditions in Mine Headings. *Teh. Vjesn.* 2018, 25, 271–276.
- 80 Cheng, J.; Li, S.; Zhang, F.; Zhao, C.; Yang, S.; Ghosh, A. CFD modelling of ventilation optimization for improving mine safety in longwall working faces. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2016, 40, 285–297. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.004
- 81 Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review / G. Xu, K.D. Luxbacher, S.Ragab, J. Xu, X. Ding // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2016. – P. 1–25.
- 82 Edwards, J.S.; Ren, T.; Jozefowicz, R. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) to solve mine safety and health problems. In *Proceedings of the APCOM XXV 1995 Conference*, Brisbane, Australia, 9–14 July 1995.
- 83 Fang, Y.; Fan, J.; Kenneally, B.; Mooney, M. Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, 58, 30–39. DOI: 10.1016/j.tust.2016.04.006
- 84 Feroze T. An initial investigation of room and pillar ventilation using CFD. 24th international mining congress and exhibition of turkey, Antalya, Turkey, 2015, pp. 1-8.
- 85 Feroze T., Genc B. Estimating the effects of line brattice ventilation system variables in an empty heading in room and pillar mining using CFD. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2016, vol.116 № 12, pp. 1143-1152
- 86 Feroze T., Genc B. A CFD model to evaluate variables of the line brattice ventilation system in an empty heading. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017, vol.117 № 2, pp. 97-108.
- 87 Feroze T., Genc B. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(2), pp. 253–259.
- 88 Gilmore, R.; Brune, J.; Marts, J.; Saki, S.; Bogin, G.; Grubb, J. Gob Ventilation Modeling on HPC Platforms using GPGPU/CPU Combinations. In *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2015): Proceedings of the 37th International Symposium*; Society for Mining Metallurgy: Fairbanks, AK, USA, 2015; pp. 904–910.
- 89 Geng, F.; Luo, G.; Zhou, F.; Zhao, P.; Ma, L.; Chai, H.; Zhang, T. Numerical investigation of dust dispersion in a coal roadway with hybrid ventilation system. *Powder Technol.* 2017, 313, 260–271. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.03.021
- 90 Geng, F.; Luo, G.; Wang, Y.; Peng, Z.; Hu, S.; Zhang, T.; Chai, H. Dust dispersion in a coal roadway driven by a hybrid ventilation system: A numerical study. *Process Saf. Environ. Prot.* 2018, 113, 388–400. DOI: 10.1016/j.psep.2017.11.010

- 91 Gosman A. D. Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering // *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1999, 81, pp. 21–39.
- 92 Gou, Y.; Shi, X.; Zhou, J.; Qiu, X.; Chen, X. Characterization and Effects of the Shock Losses in a Parallel Fan Station in the Underground Mine. *Energies* 2017, 10, 785.
- 93 Guo, H.; Todhunter, C.; Qu, Q.; Qin, Z. Longwall horizontal gas drainage through goaf pressure control. *Int. J. Coal Geol.* 2015, 150–151, 276–286. DOI: 10.1016/j.coal.2015.09.003
- 94 Hargreaves, D.M.; Lowndes, I.S. The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2007, 22, 150–160. DOI: 10.1016/j.tust.2006.06.002
- 95 Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S. M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 89, pp. 68–77.
- 96 Heerden, J.; Sullivan, P. The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilation systems used with continuous miners. In *Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium*, Salt Lake City, UT, USA, 21–23 June 1993; pp. 293–297.
- 97 Hurtado, J.P.; Acuña, E.I. CFD analysis of 58 Adit main fans parallel installation for the 2015–2019 underground developments of the new level mine project. *Appl. Therm. Eng.* 2015, 90, 1109–1118. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.05.014
- 98 Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: problems and solutions // *Eurasian Mining*. 2015. № 2. p. 26-30.
- 99 Kolesov E.V., Nakaryakov E.V. Selection of turbulence model in ventilation modeling for blind stopes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – T. 773. – №. 1. – C. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012071
- 100 Krog, R.B.; Schatzel, S.J.; Garcia, F.; Marshall, J.K. Predicting methane emissions from wider longwall panels by analysis of emission contributors. In *Proceedings of the 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*, Pennsylvania, PA, USA, 5–7 June 2006.
- 101 Kurnia, J.C.; Sasmito, A.P.; Mujumdar, A.S. CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. *Appl. Math. Model.* 2014, 38, 3467–3484. DOI: 10.1016/j.apm.2013.11.067
- 102 Kurnia, J.C.; Sasmito, A.P.; Mujumdar, A.S. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 42, 206–215. DOI: 10.1016/j.tust.2014.03.009
- 103 Kurnia, J.C.; Sasmito, A.P.; Wong, W.Y.; Mujumdar, A.S. Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines. *Sci. Total Environ.* 2014, 481, 317–334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.058
- 104 Kurnia, J.C.; Xu, P.; Sasmito, A.P. A novel concept of enhanced gas recovery strategy from ventilation air methane in underground coal mines – A computational investigation. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2016, 35, 661–672. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.09.013
- 105 Levin L.Yu., Semin M.A., Klyukin Yu.A. Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks // *Proceedings of XLII International Summer Scholl-Conference APM*, 2014. – pp. 25-32.
- 106 Lew A., Buscaglia G., Garrica P. A note on the numerical treatment of the k-epsilon turbulence model // *International Journal of Computational Fluid Dynamics* – 2001. V. 14(3). – pp. 201 – 209.

- 107 Li, M.; Aminossadati, S.M.; Wu, C. Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, 52, 38–43. DOI: 10.1016/j.tust.2015.11.009
- 108 Marshall E. M., Bakker A. Computational fluid mixing. Fluid Dynamics Fluent Incorporated, 2001, 154 p.
- 109 Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal.* 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
- 110 Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer.* 2003, no. 4, pp. 625–632.
- 111 Meyer C.F. The effect of last through road air velocities on unventilated headings. Project CC8E10, COMRO, 1989, 15 p.
- 112 Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model. New York: Wiley, 1994, 194 p.
- 113 Moloney, K.W. An Analysis of Airflow Patterns in Auxiliary Ventilated Drivages. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK, 1997.
- 114 Moloney, K.W.; Lowndes, I.S.; Hargrave, G.K. Analysis of flow patterns in drivages with auxiliary ventilation. *Trans. Inst. Min. Metall. Sect. A Min. Technol.* 1999, 108, A17–A26.
- 115 Moloney, K.W.; Lowndes, I.S. Comparison of measured underground air velocities and air flows simulated by computational fluid dynamics. *Trans. Inst. Min. Metall. Sect. A Min. Technol.* 1999, 108, A105–A114.
- 116 Nakaryakov E.V., Grishin E.L. Ventilation in long blind stopes during operation of load-haul-dumpers with combustion engines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – T. 773. – №. 1. – C. 012077. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012077
- 117 Ndenguma, D.D. Computational Fluid Dynamics Model for Controlling Dust and Methane in Underground Coalmines. Master's Thesis, University of Pretoria, South Africa, 2010.
- 118 Nel A. J. H., Vosloo J. C., Mathews M. J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // *Journal of Energy in Southern Africa* — 2018. — № 29 (3). — Pp. 22—32.
- 119 Oberholzer, D.R.J.W.; Meyer, C.F. The evaluation of heading ventilation systems through the use of computer simulations. In *Proceedings of the 7th US Mine Ventilation Symposium*, Lexington, KY, USA, 5–7 June 1995.
- 120 Oberholzer, D.R.J.W.; Meyer, C.F. Computer modelling in the solution of continuous miner heading ventilation problems. In *Proceedings of the APCOM XXV 1995 Conference*, Brisbane, Australia, 9–14 July 1995.
- 121 Park J., Jo Y., Park G. Flow characteristics of fresh air discharged from a ventilation duct for mine ventilation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32 (3), pp. 1187–1194.
- 122 Parra M., Villafruela J., Castro F., Mendez C. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*, 2006, 41, pp. 87–93. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.002
- 123 Pope S.B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, New York, 2000. 771 p.

- 124 Qin, Z.; Yuan, L.; Guo, H.; Qu, Q. Investigation of longwall goaf gas flows and borehole drainage performance by CFD simulation. *Int. J. Coal Geol.* 2015, 150–151, 51–63. DOI: 10.1016/j.coal.2015.08.007
- 125 Ren, T.; Balusu, R. Dust Control Technology Development for Longwall Faces—Shearer Scrubber Development; Australian Coal Association Research Program, Brisbane: Queensland, Australia, 2007; p. 58.
- 126 Ren, T.; Balusu, R. Innovative CFD modelling to improve dust control in longwalls. In 8th Underground Coal Operators' Conference; Aziz, N., Ed.; University of Wollongong: Wollongong, Australia, 2008; pp. 137–142.
- 127 Ren, T.; Balusu, R. The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems. In 10<sup>th</sup> Underground Coal Operators' Conference; Aziz, N., Kininmonth, B., Nemicik, J., Eds.; University of Wollongong: Wollongong, Australia, 2010; pp. 339–349.
- 128 Ren, T.; Wang, Z.; Plush, B.; Cooper, G.; Cook, A.; Karekal, S.; Yarlagaadda, S. Improved Dust Control on Longwalls Using a New Water Mist Venturi System; Australian Coal Association Research Program, Brisbane: Queensland, Australia, 2012; p. 89.
- 129 Ren, T.; Wang, Z.; Cooper, G. CFD modelling of ventilation and dust flow behaviour above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 41, 241–254.
- 130 Sasmito, A.P.; Birgersson, E.; Ly, H.C.; Mujumdar, A.S. Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment—A computational fluid dynamic study. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2013, 34, 82–95. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.006
- 131 Shi, G.; Liu, M.; Guo, Z.; Hu, F.; Wang, D. Unsteady simulation for optimal arrangement of dedusting air duct in coal mine heading face. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2017, 46, 45–53. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.01.011
- 132 Sorensen D. N., Nielsen P. V. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments // *Indoor Air*, 2003, 13, pp. 2–17.
- 133 Spalart P., Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *Recherche Aerospaciale*. 1994, vol. 439, no. 1, pp. 5–21.
- 134 Srinivasa, R.B. Design and Development of a Multi-Scrubber Dust Control System for Longwall Faces: Experimental and Modelling Studies. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 1993.
- 135 Toraño, J.; Torno, S.; Menendez, M.; Gent, M.; Velasco, J. Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining. *Int. J. Coal Geol.* 2009, 80, 35–43. DOI: 10.1016/j.coal.2009.07.008
- 136 Torno S., Torano J., Ulecia M., Allende C. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2013. – V. 34. – P. 73-81. DOI: 10.1016/j.tust.2012.11.003
- 137 Tutak, M.; Brodny, J. Analysis of Influence of Goaf Sealing from Tailgate on the Methane Concentration at the Outlet from the Longwall. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2017, 95, 042025. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042025
- 138 Wala, M.A.; Yingling, J.C.; Zhang, J. Evaluation of the face ventilation systems for extended cuts with remotely operated mining machines using three-dimensional numerical simulations. In *Proceedings of the SME Annual Meeting, Orlando, FL, USA, 9–11 March 1998*.
- 139 Wala, M.A.; Huang, P.G.; Brown, J.T. New approaches to mine-face ventilation. *Min. Eng.* 2003, 55, 25–30.

- 140 Wala, M.A.; Vytla, S.; Taylor, C.D.; Huang, P.G. Mine face ventilation: A comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. *Min. Eng.* 2007, 59, 49–55.
- 141 Wang, H.; Cheng, W.; Sun, B.; Ma, Y. Effects of radial air flow quantity and location of an air curtain generator on dust pollution control at fully mechanized working face. *Adv. Powder Technol.* 2017, 28, 1780–1791. DOI: 10.1016/j.appt.2017.04.019
- 142 Wang, H.; Nie, W.; Cheng, W.; Liu, Q.; Jin, H. Effects of air volume ratio parameters on air curtain dust suppression in a rock tunnel's fully-mechanized working face. *Adv. Powder Technol.* 2018, 29, 230–244. DOI: 10.1016/j.appt.2017.11.007
- 143 Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries Inc. 1998. 477 p.
- 144 Xia, Y.; Yang, D.; Hu, C.; Wu, C.; Han, J. Numerical simulation of ventilation and dust suppression system for open-type TBM tunneling work area. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2016, 56, 70–78. DOI: 10.1016/j.tust.2016.03.003
- 145 Xu, G.; Luxbacher, K.D.; Ragab, S.; Schafrik, S. Development of a remote analysis method for underground ventilation systems using tracer gas and CFD in a simplified laboratory apparatus. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2013, 33, 1–11. DOI: 10.1016/j.tust.2012.09.001
- 146 Xu, G.; Jong, E.C.; Luxbacher, K.D.; Ragab, S.A.; Karmis, M.E. Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine. *Saf. Sci.* 2015, 74, 140–149. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.01.004
- 147 Xu, G.; Luxbacher, K.D.; Ragab, S.; Xu, J.; Ding, X. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: A review. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 2017, 31, 251–275. DOI: 10.1080/17480930.2016.1138570
- 148 Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B., Speziale C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: fluid dynamics.* 1992, 4, pp. 1510–1520.
- 149 Yu, H.; Cheng, W.; Wang, H.; Peng, H.; Xie, Y. Formation mechanisms of a dust-removal air curtain in a fully-mechanized excavation face and an analysis of its dust-removal performances based on CFD and DEM. *Adv. Powder Technol.* 2017, 28, 2830–2847. DOI: 10.1016/j.appt.2017.08.010
- 150 Zhang, Q.; Zhou, G.; Qian, X.; Yuan, M.; Sun, Y.; Wang, D. Diffuse pollution characteristics of respirable dust in fully-mechanized mining face under various velocities based on CFD investigation. *J. Clean. Prod.* 2018, 184, 239–250. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.230
- 151 Zheng, Y.; Tien, J.C. Simulation of longwall face methane distribution. In *Proceedings of the SME Annual Meeting, Colorado, FL, USA, 22–25 February 2009*.
- 152 Zhou, G.; Zhang, Q.; Bai, R.; Fan, T.; Wang, G. The diffusion behavior law of respirable dust at fully mechanized caving face in coal mine: CFD numerical simulation and engineering application. *Process Saf. Environ. Prot.* 2017, 106, 117–128. DOI: 10.1016/j.psep.2016.12.005
- 153 Zhou Z., Hu P., Han Z., Chen J. Effect of heading face ventilation arrangement on regulation of dust distribution // *Journal of Central South University. Science and Technology.* 2018. Vol. 49, no 9, pp. 2264-2271.

## **Приложение 1. Результаты экспериментальных измерений качественного состава исходящей струи воздуха из очистных тупиковых камерообразных горных выработок на рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель»**

В приложении приведены графики временной динамики концентраций газов, выделяющихся при ведении горных работ в тупиковых очистных камерах (от взрывных работ и двигателей внутреннего сгорания).

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере 10-9-1 подземного рудника «Таймырский» приведены на рисунках П.1, П.2.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере 10-8-2 подземного рудника «Таймырский» приведены на рисунках П.3, П.4, П.5.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский» приведены на рисунках П.6, П.7, П.8.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский» приведены на рисунках П.9, П.10, П.11.

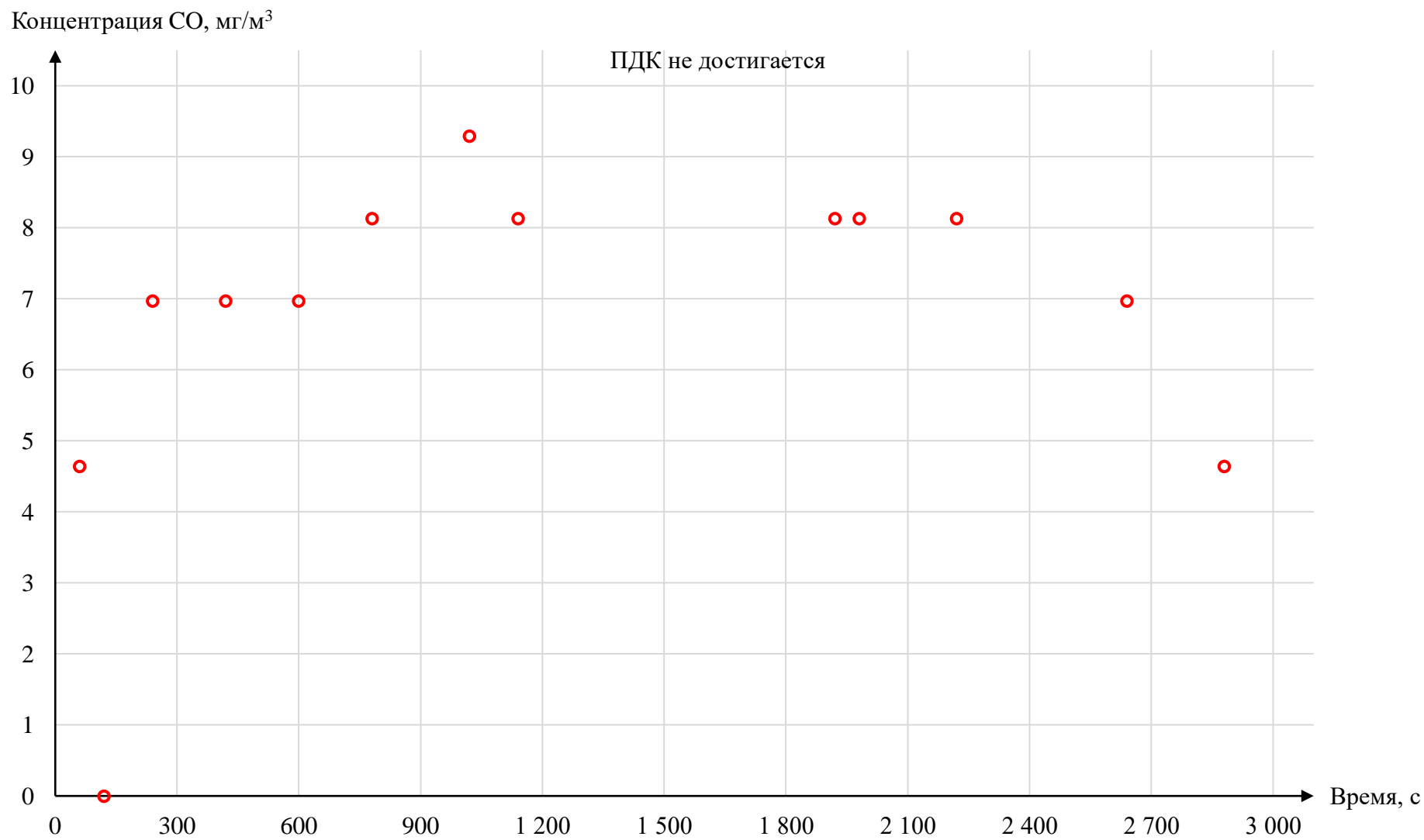
Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк» приведены на рисунках П.12, П.13, П.14.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере КАМ-3Д-2С подземного рудника «Маяк» приведены на рисунках П.15, П.16, П.17.

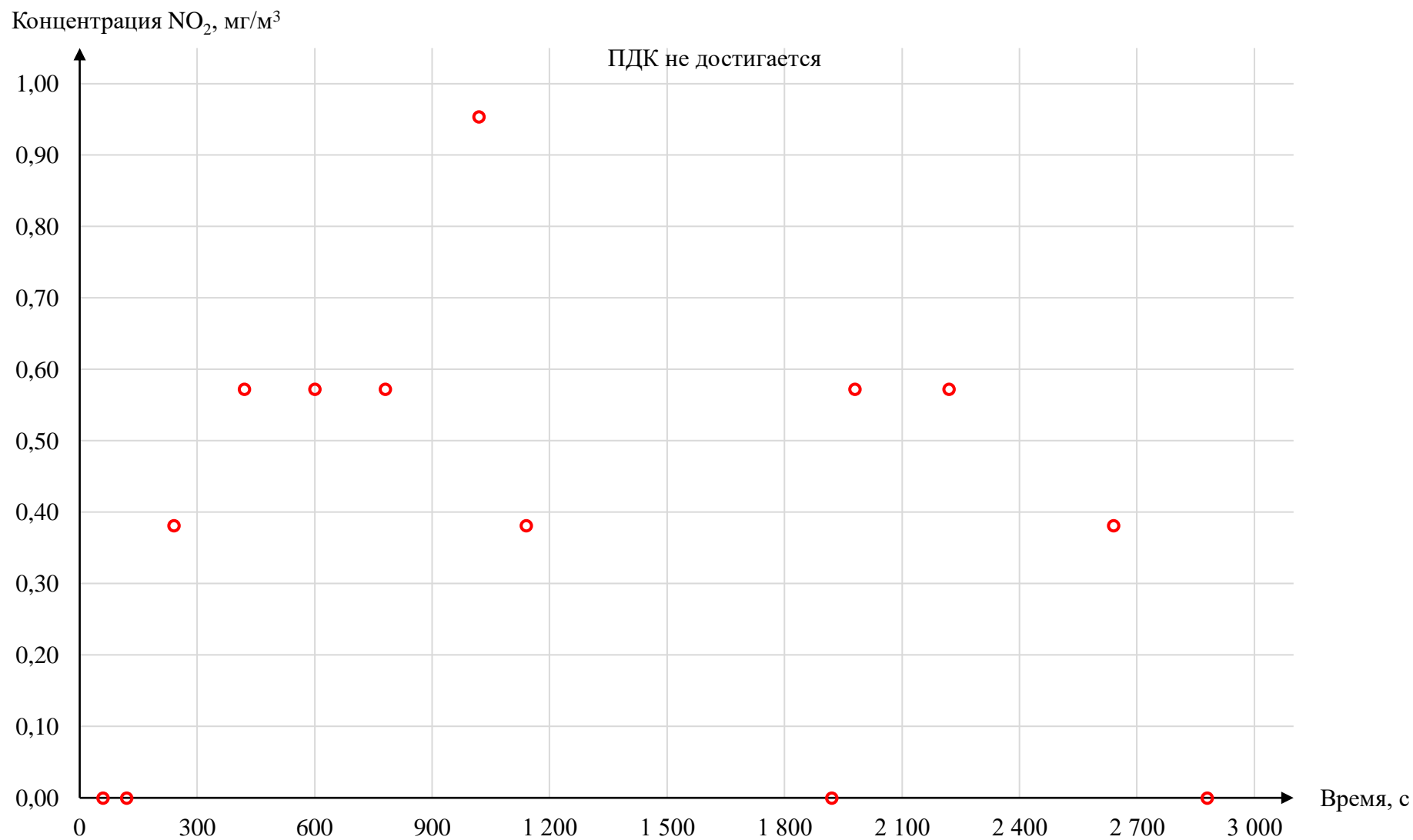
Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский» приведены на рисунках П.18, П.19, П.20.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский» приведены на рисунках П.21, П.22, П.23.

Результаты натурных измерений концентраций газов в очистной тупиковой камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый» приведены на рисунках П.24, П.25, П.26.

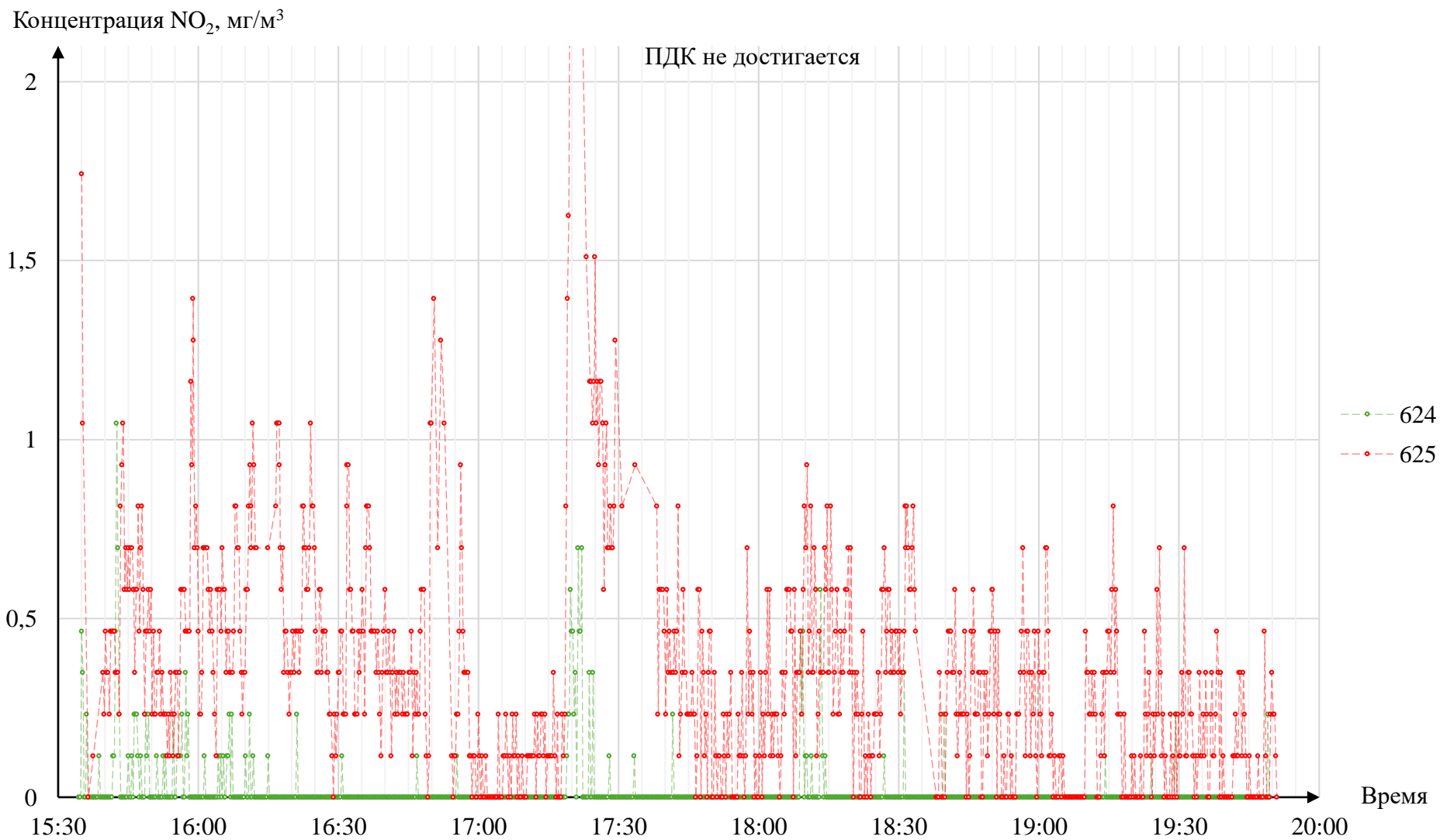


**Рисунок П.1 – Значения измеренных концентраций CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 10-9-1 подземного рудника «Таймырский»**



**Рисунок П.2 – Значения измеренных концентраций NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 10-9-1 подземного рудника «Таймырский»**





**Рисунок П.3 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 10-8-2 подземного рудника «Таймырский»**

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

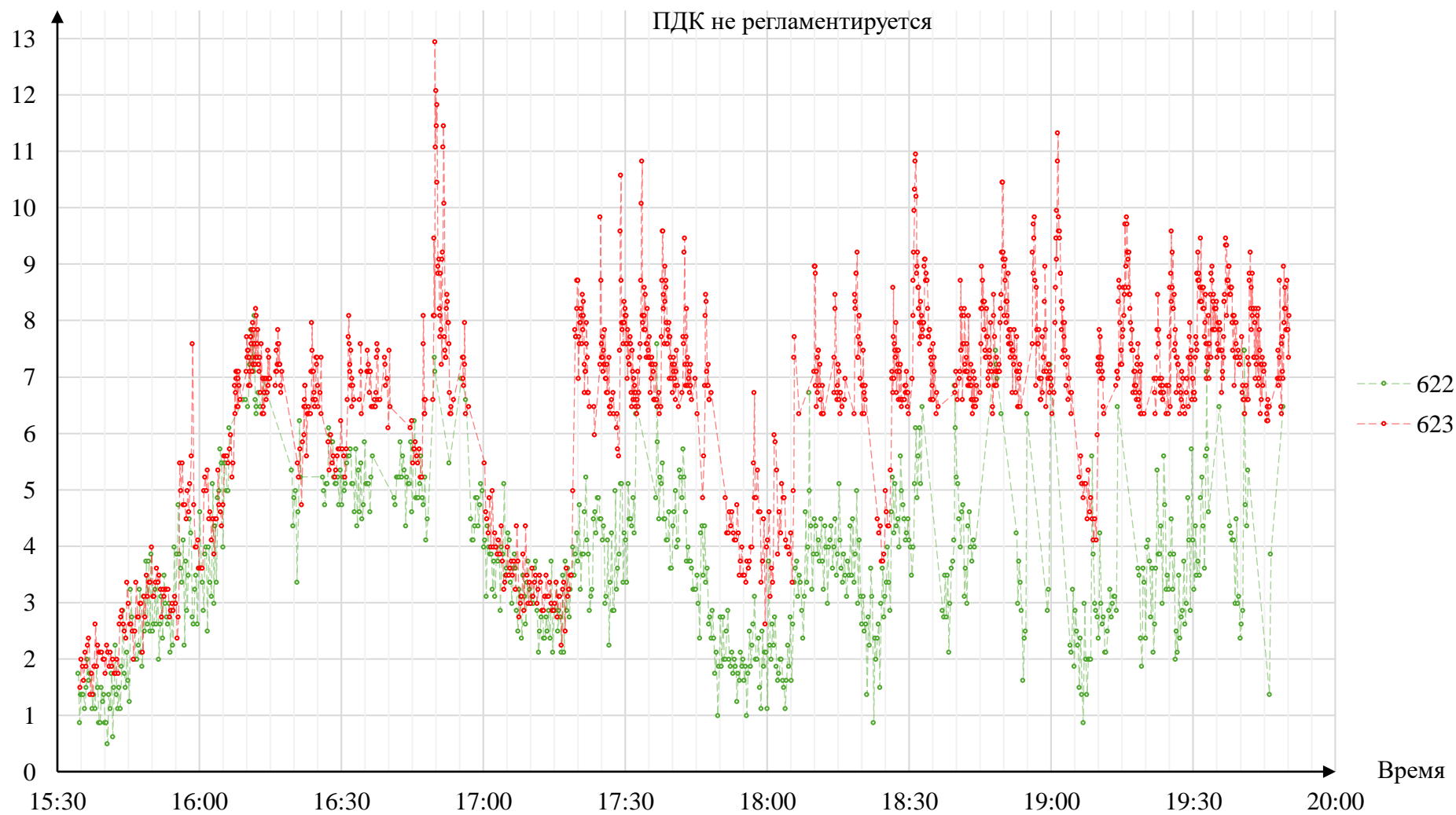
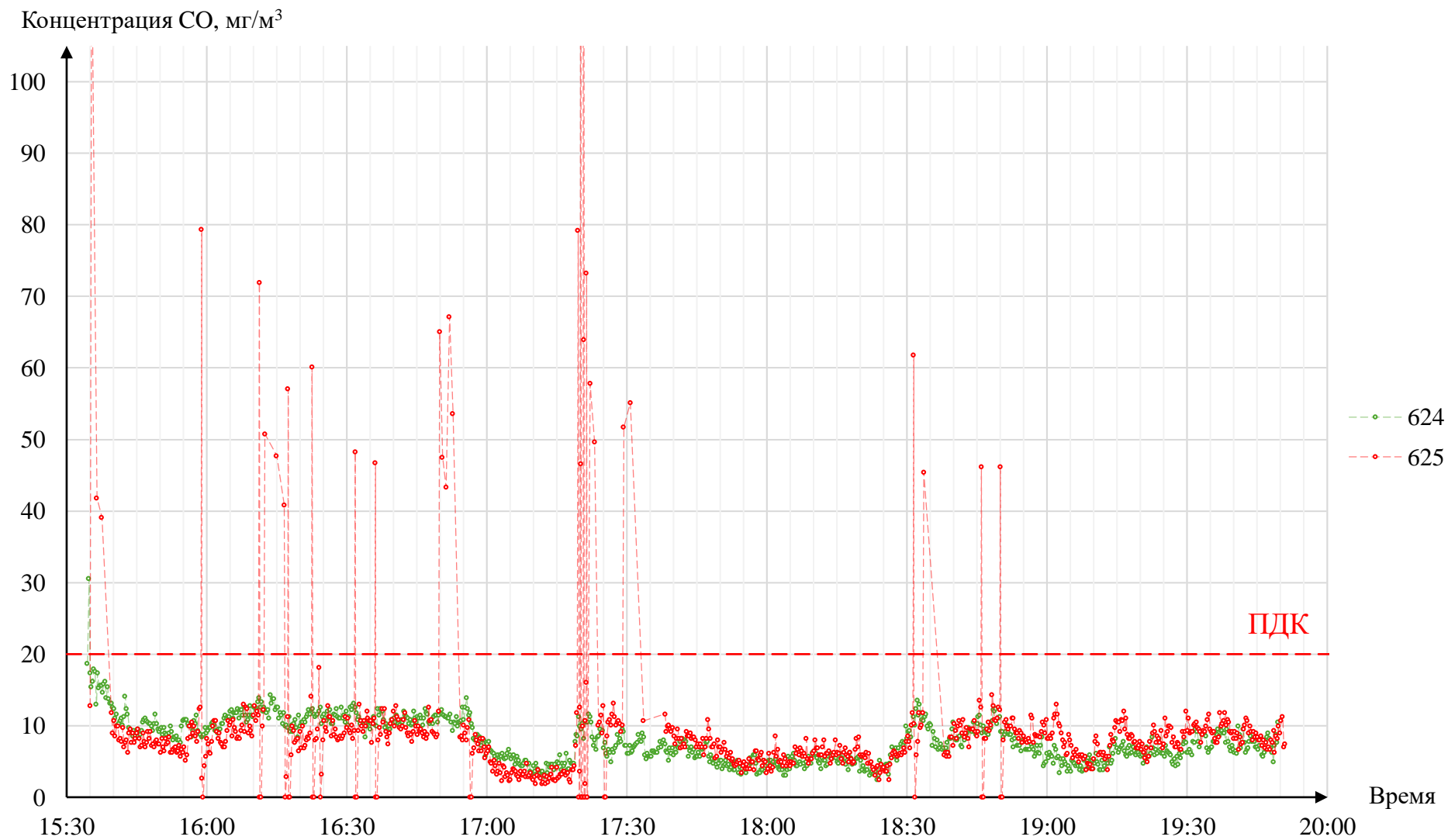


Рисунок П.4 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 10-8-2 подземного рудника «Таймырский»



**Рисунок П.5 – Результаты измерений временной динамики концентрации СО на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 10-8-2 подземного рудника «Таймырский»**

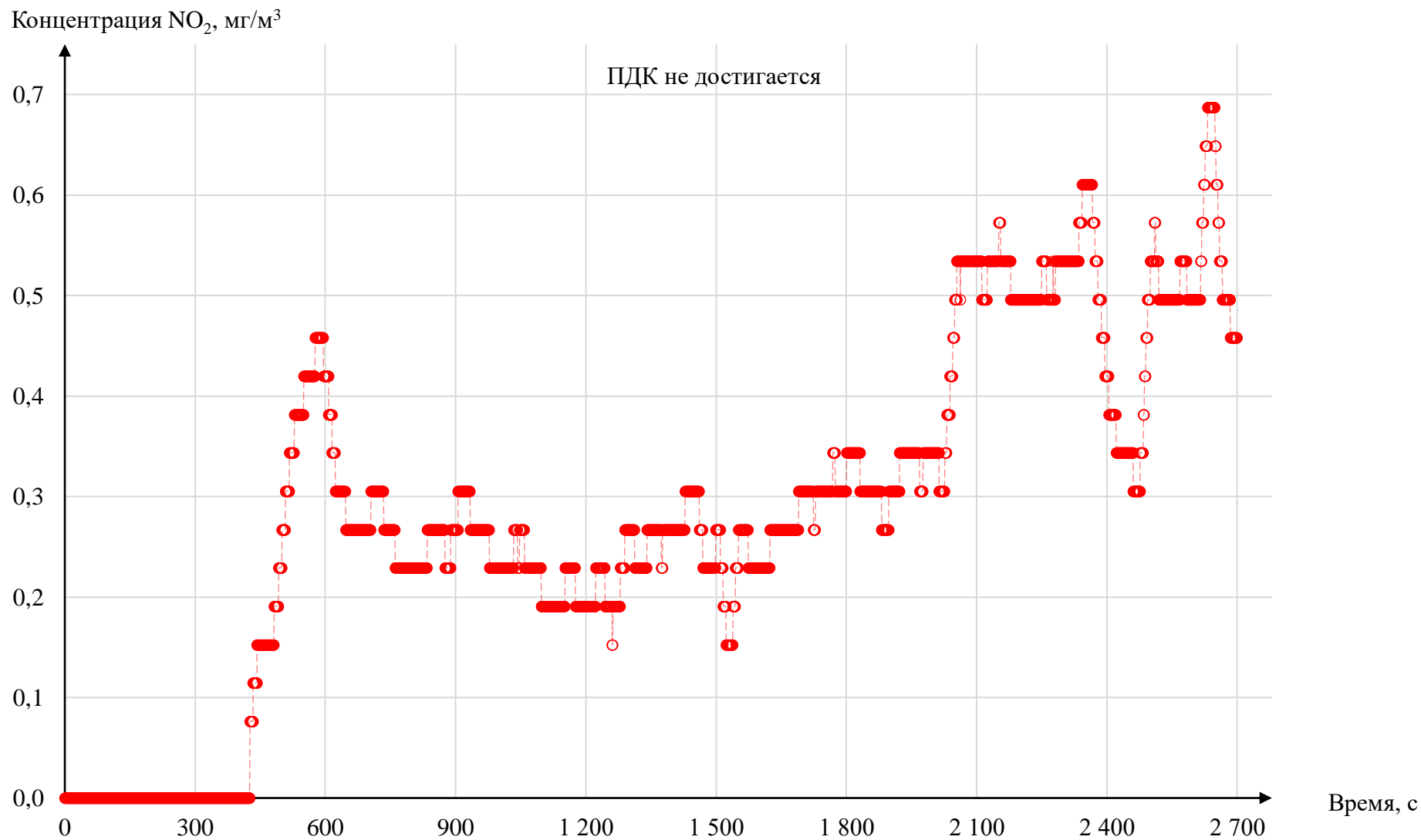


Рисунок П.6 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский»

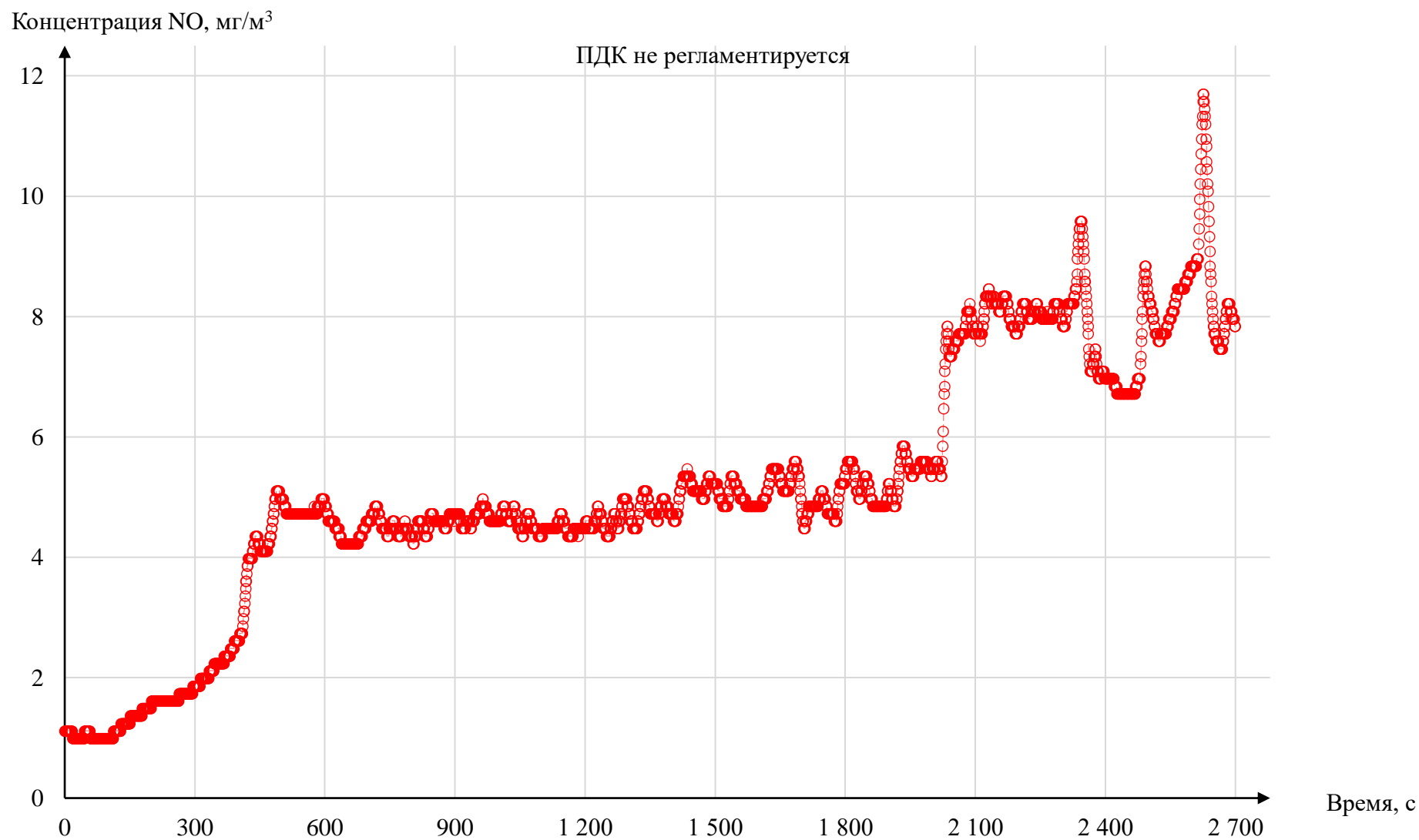


Рисунок П.7 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский»

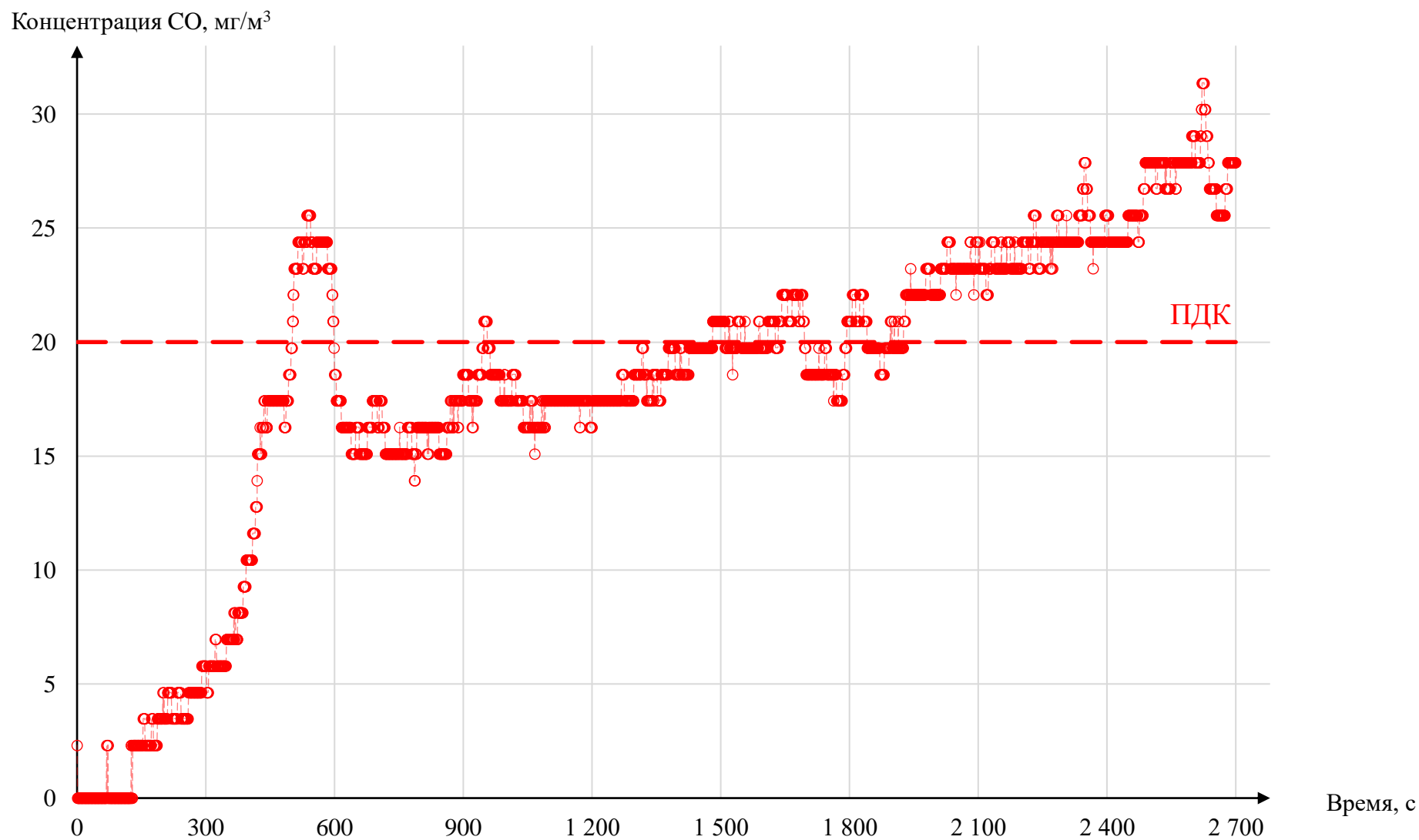
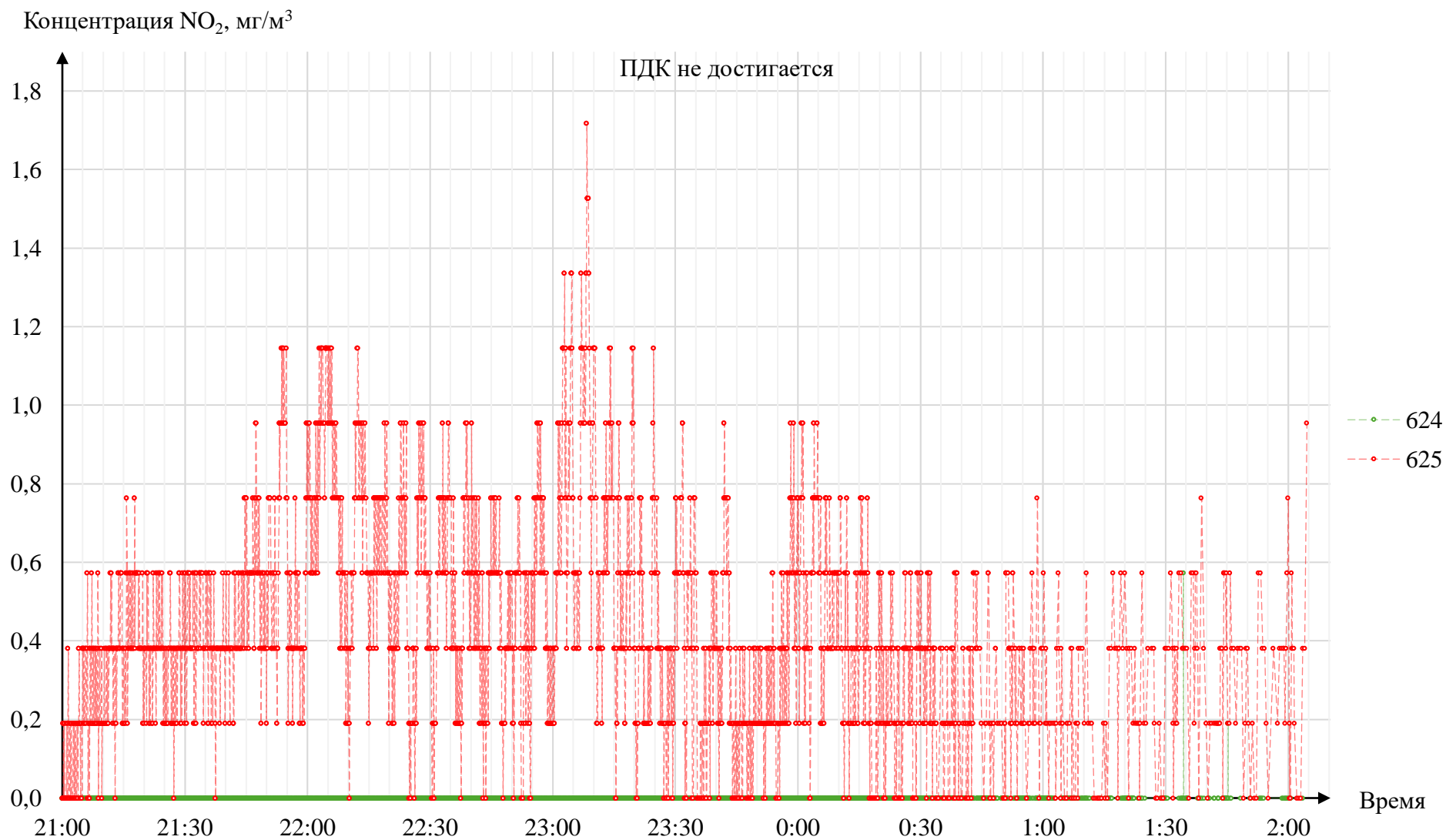


Рисунок П.8 – Результаты измерений временной динамики концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере 1-1-1 подземного рудника «Комсомольский»



**Рисунок П.9 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский»**

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

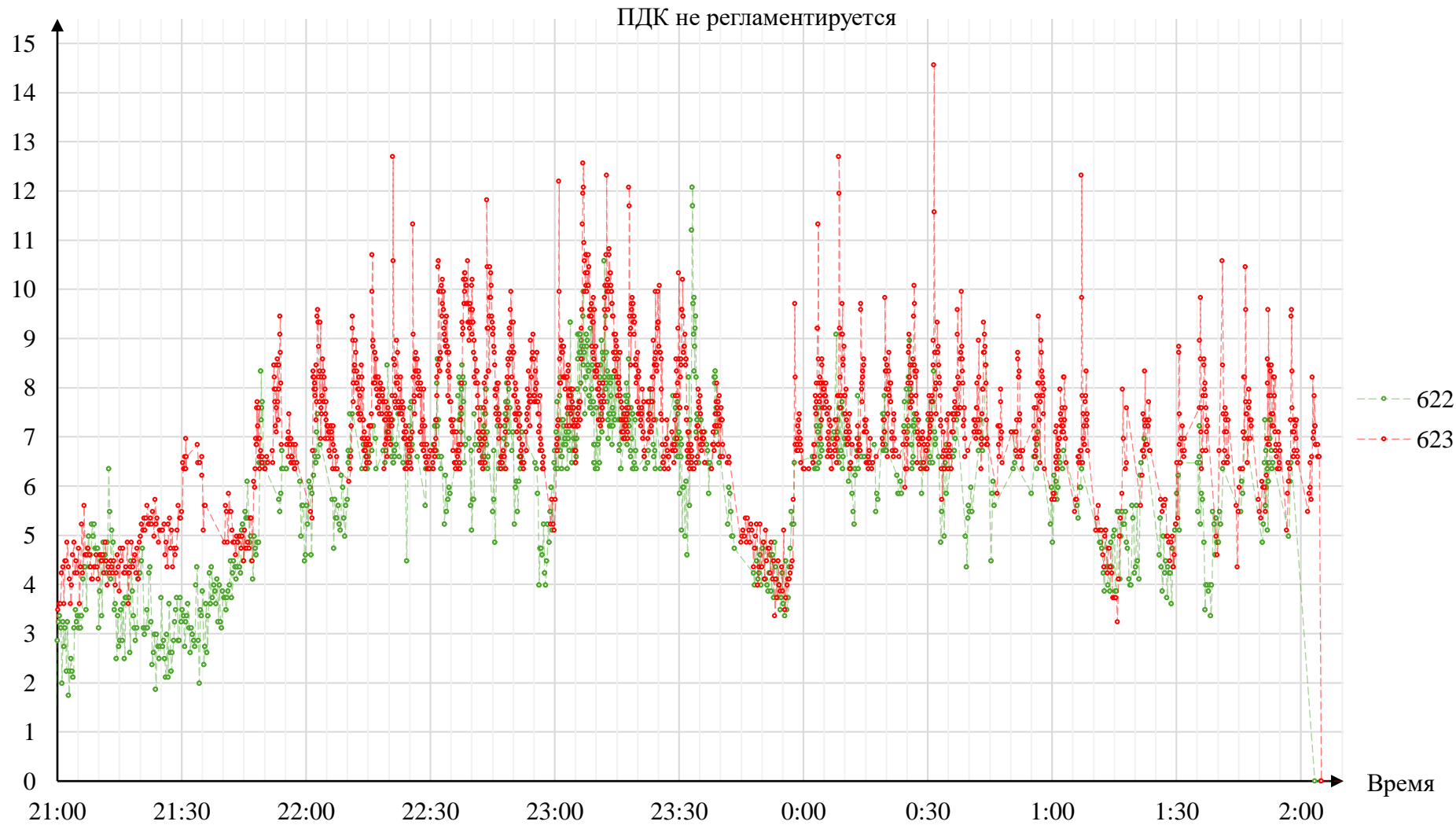


Рисунок П.10 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский»



Концентрация CO, мг/м<sup>3</sup>

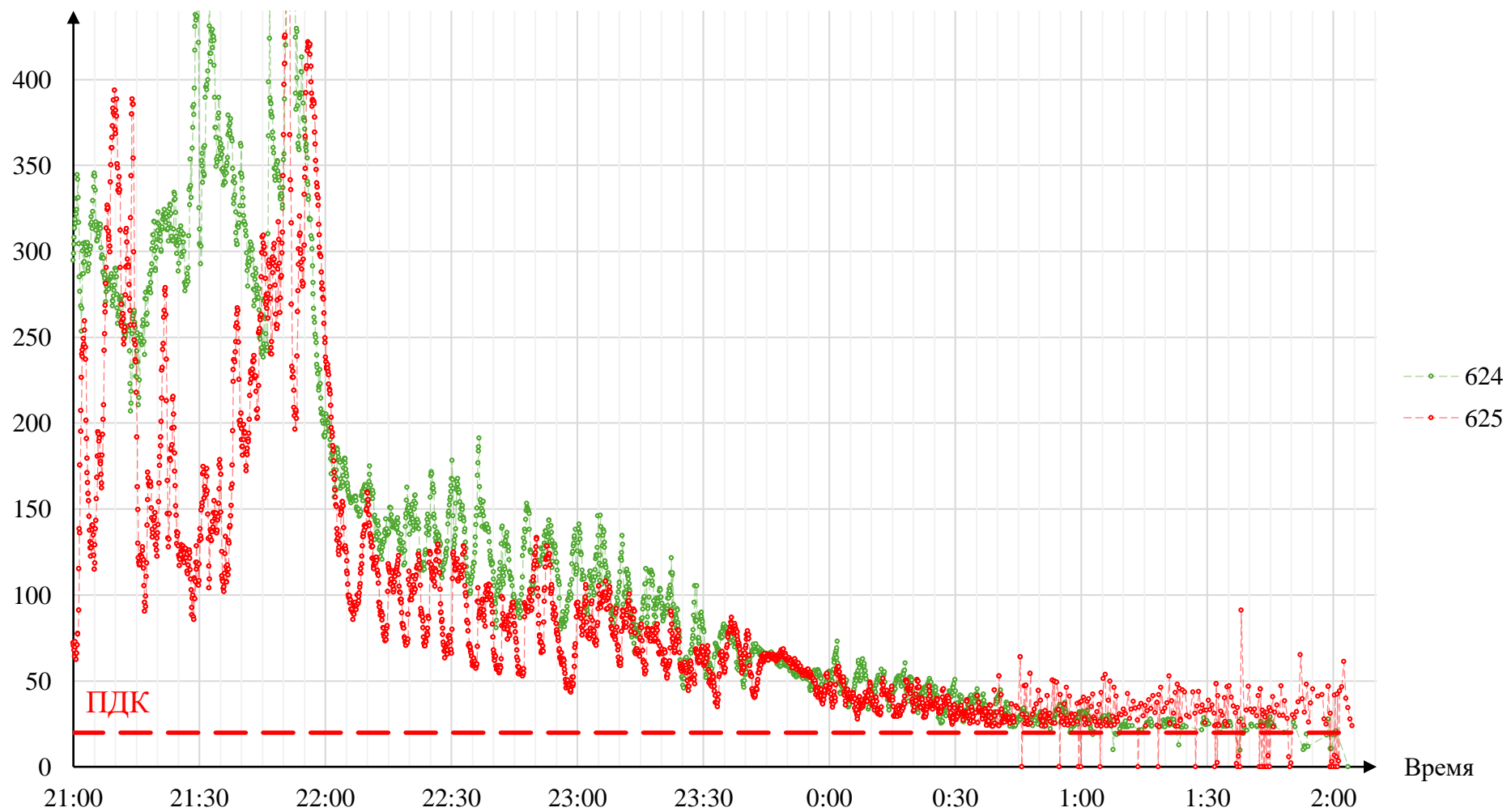


Рисунок П.11 – Результаты измерений временной динамики концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-02-69з-1 подземного рудника «Комсомольский»

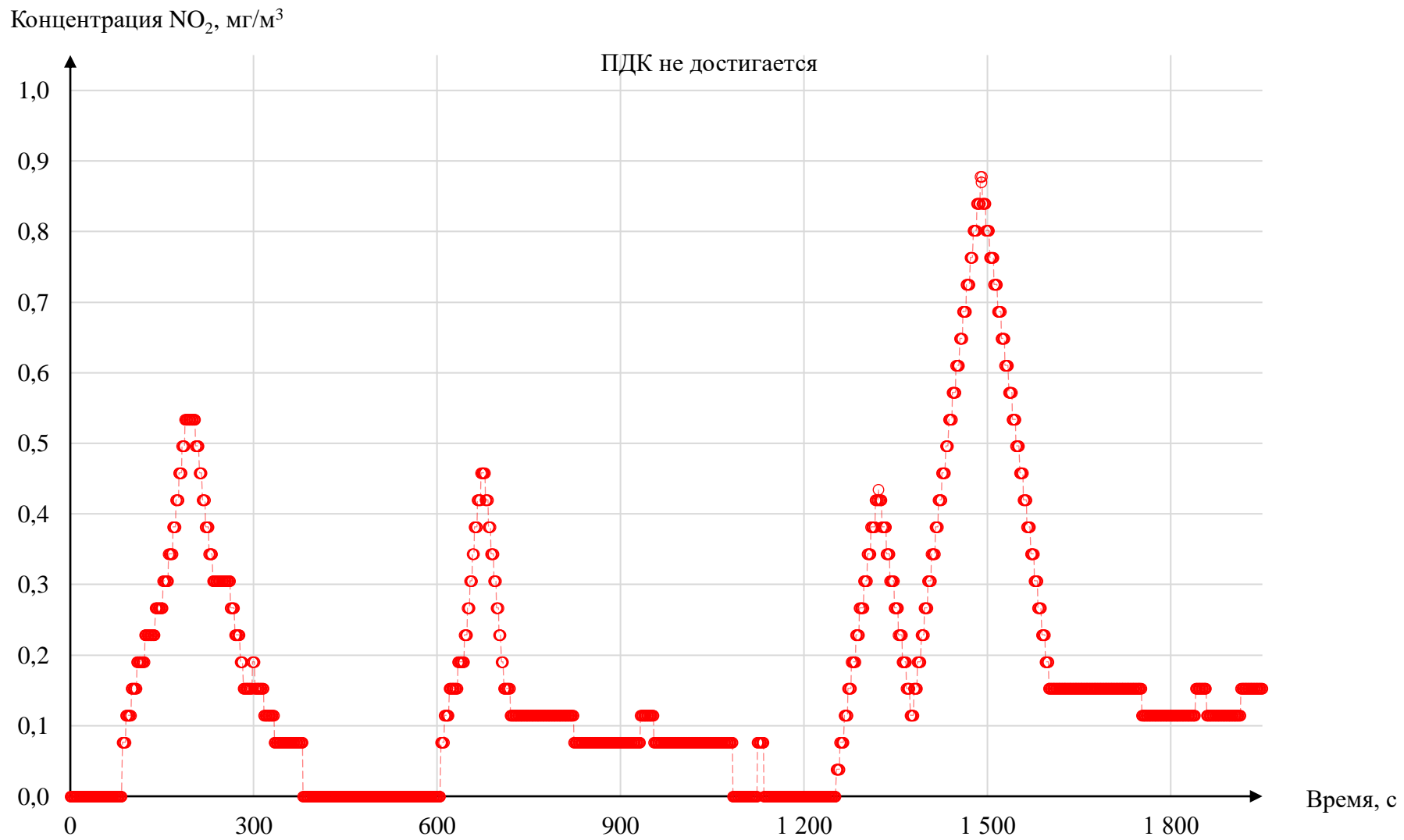


Рисунок П.12 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк»

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

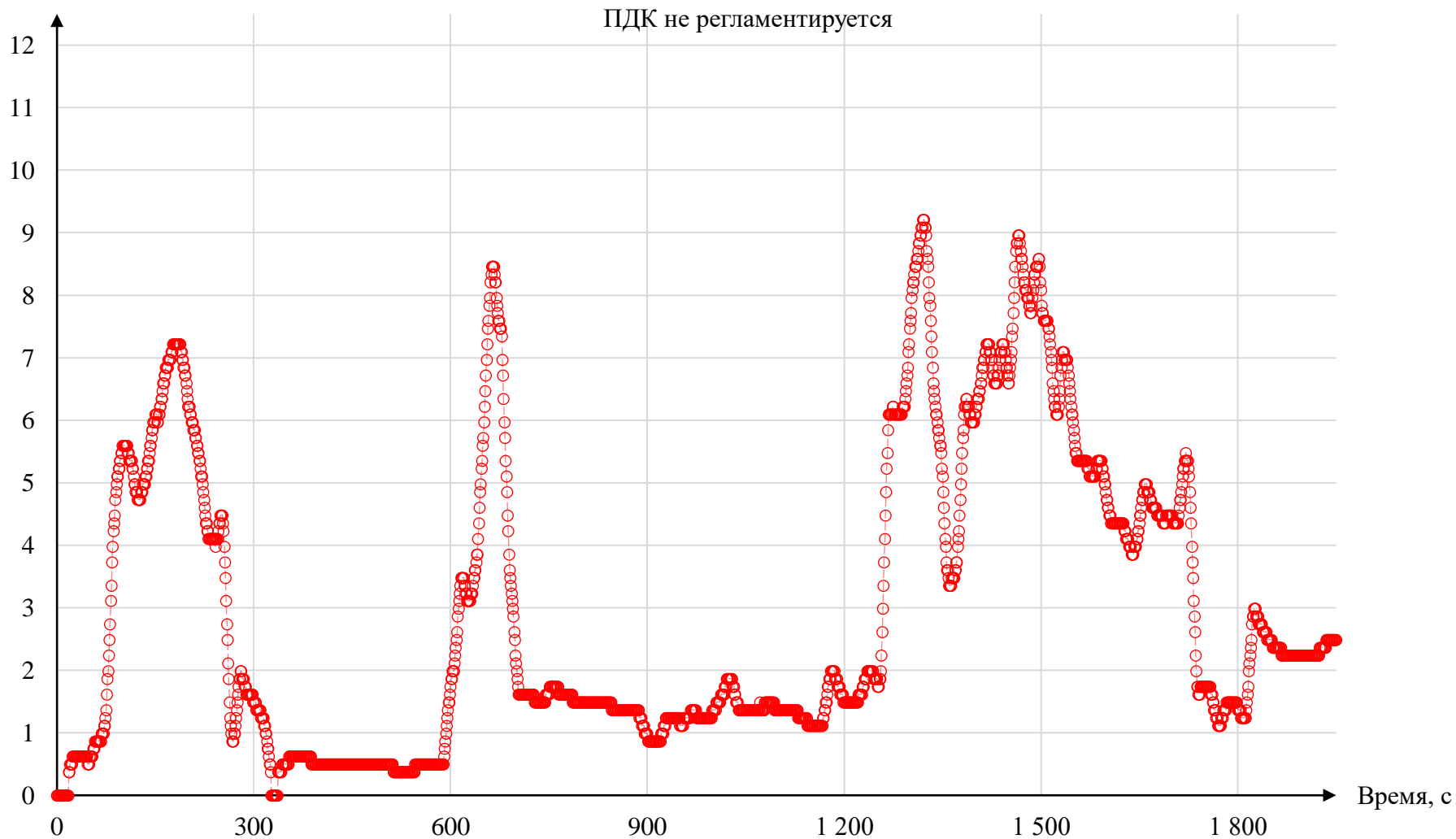


Рисунок П.13 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк»

Концентрация СО, мг/м<sup>3</sup>

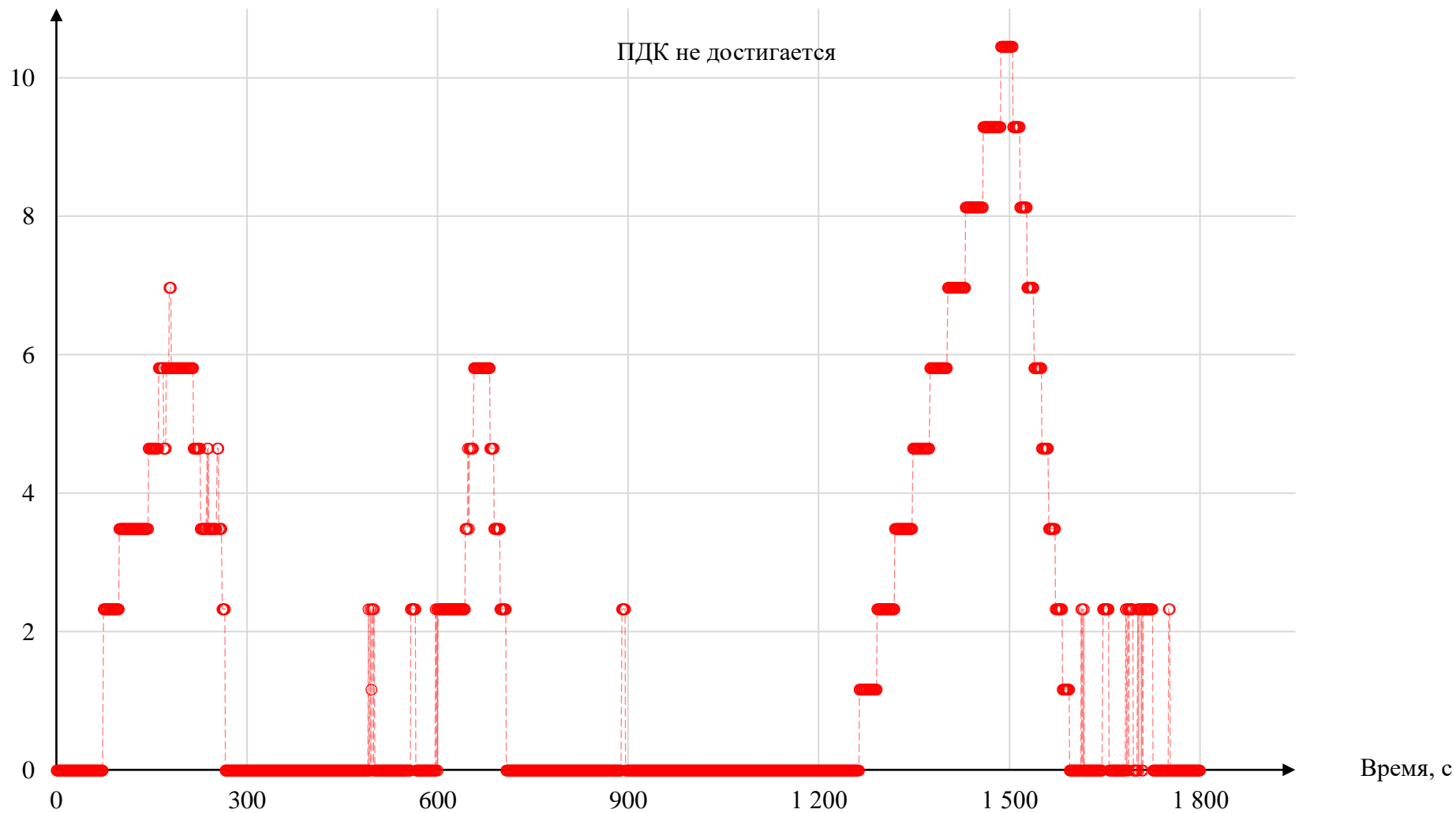
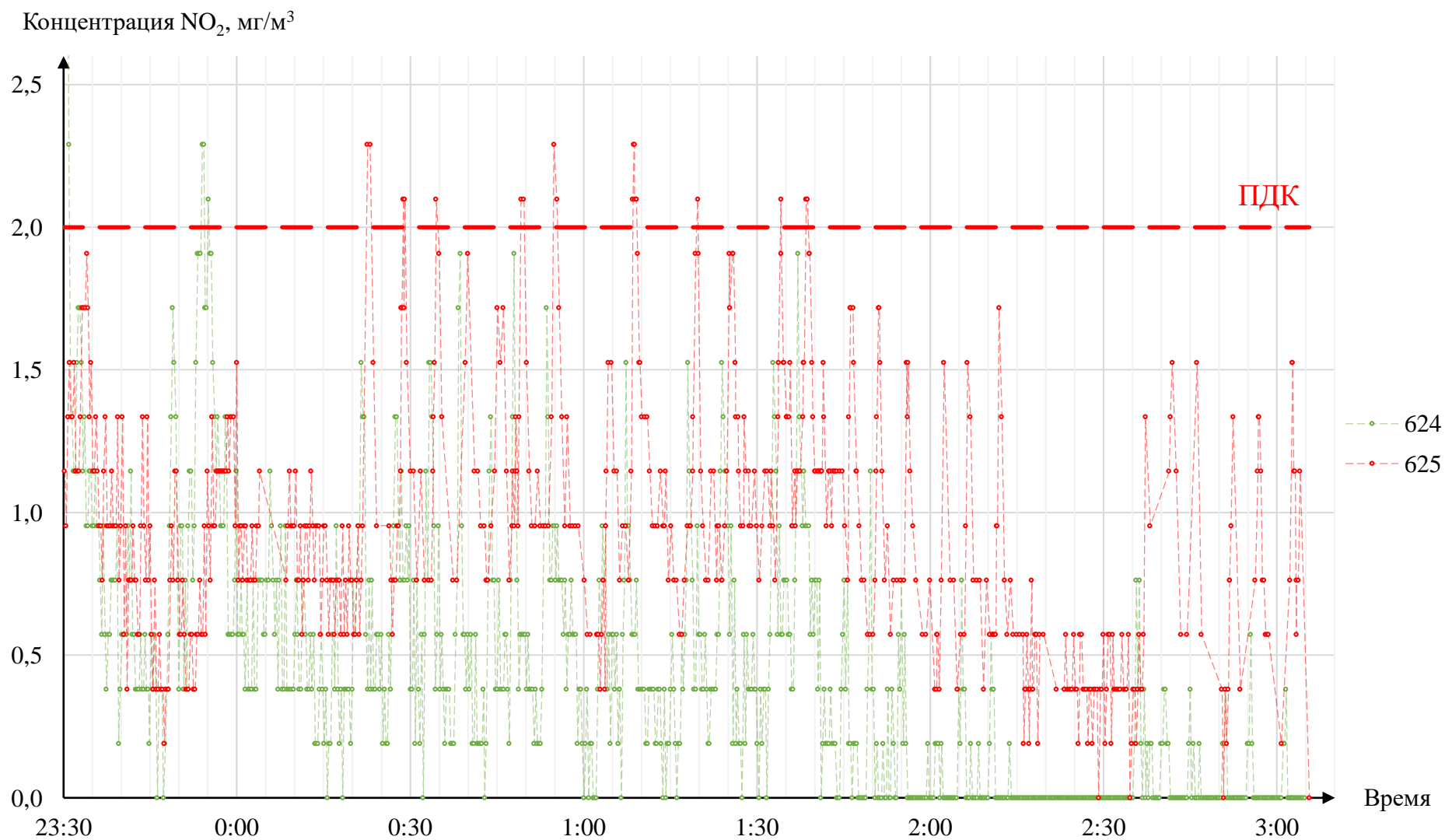


Рисунок П.14 – Результаты измерений временной динамики концентрации СО на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-11-15-на\_3 подземного рудника «Маяк»



**Рисунок П.15 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-ЗД-2С подземного рудника «Маяк»**

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

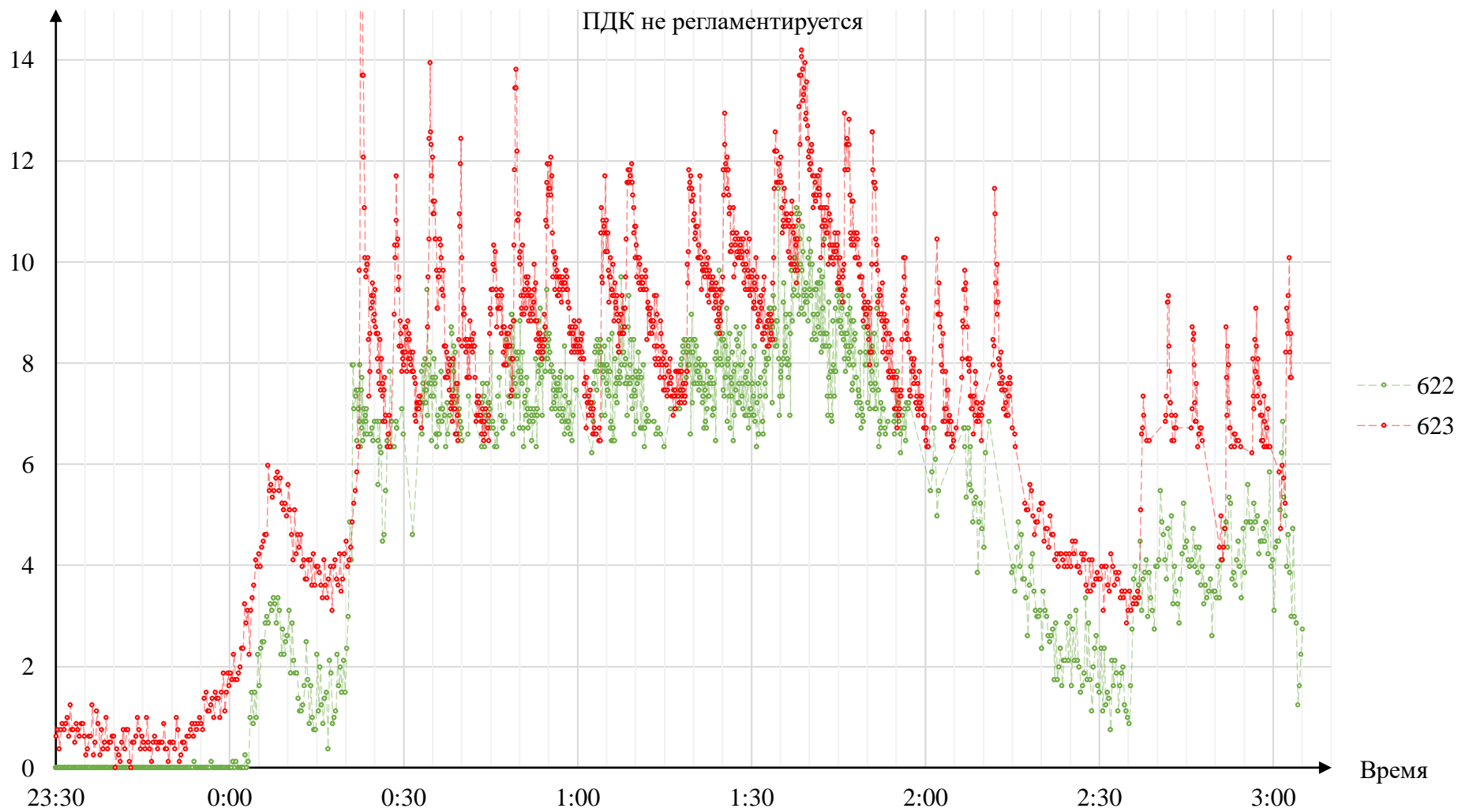
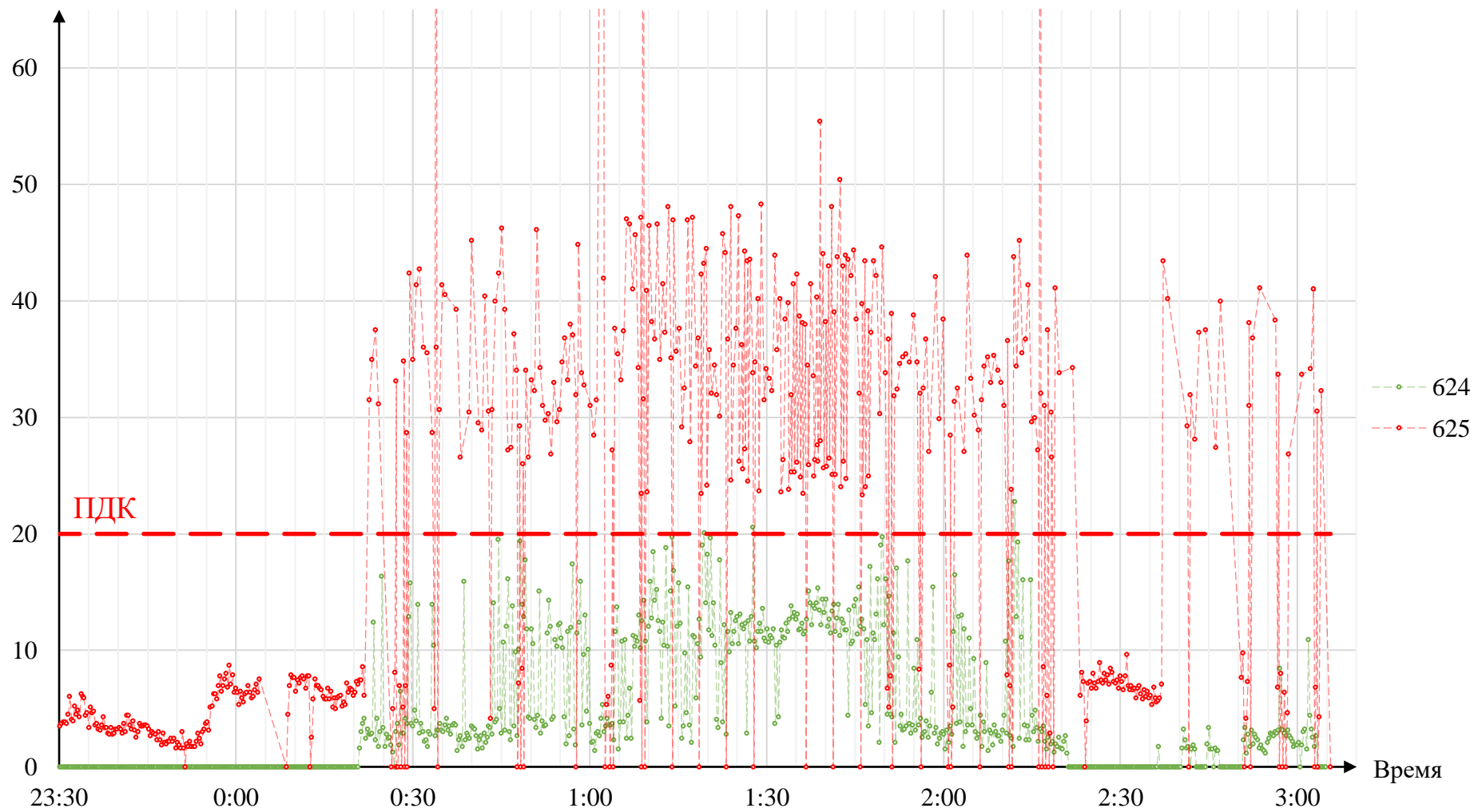


Рисунок П.16 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-3Д-2С подземного рудника «Маяк»

Концентрация CO, мг/м<sup>3</sup>



**Рисунок П.17 – Результаты измерений временной динамики концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной тупиковой камере КАМ-ЗД-2С подземного рудника «Маяк»**

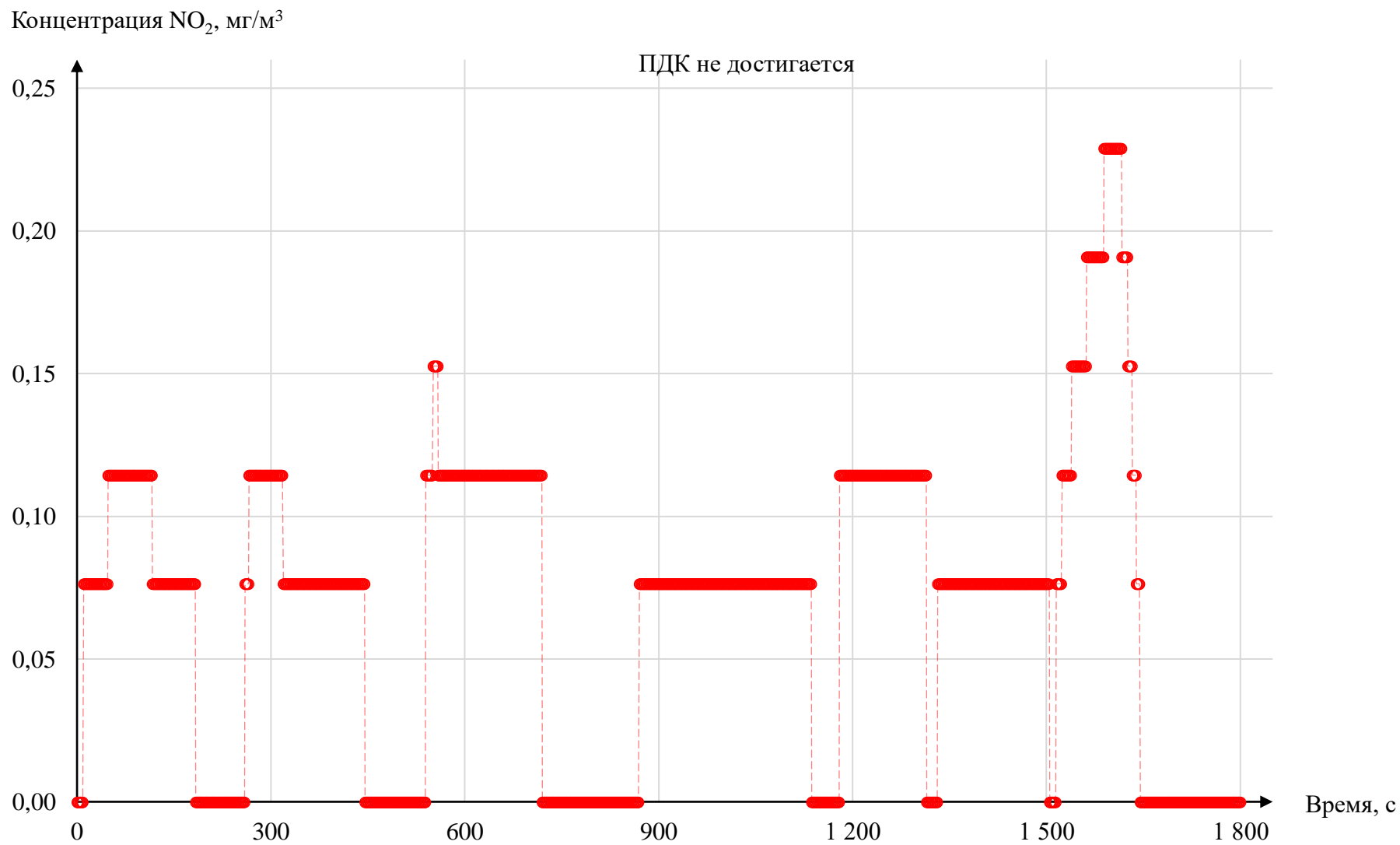


Рисунок П.18 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский»



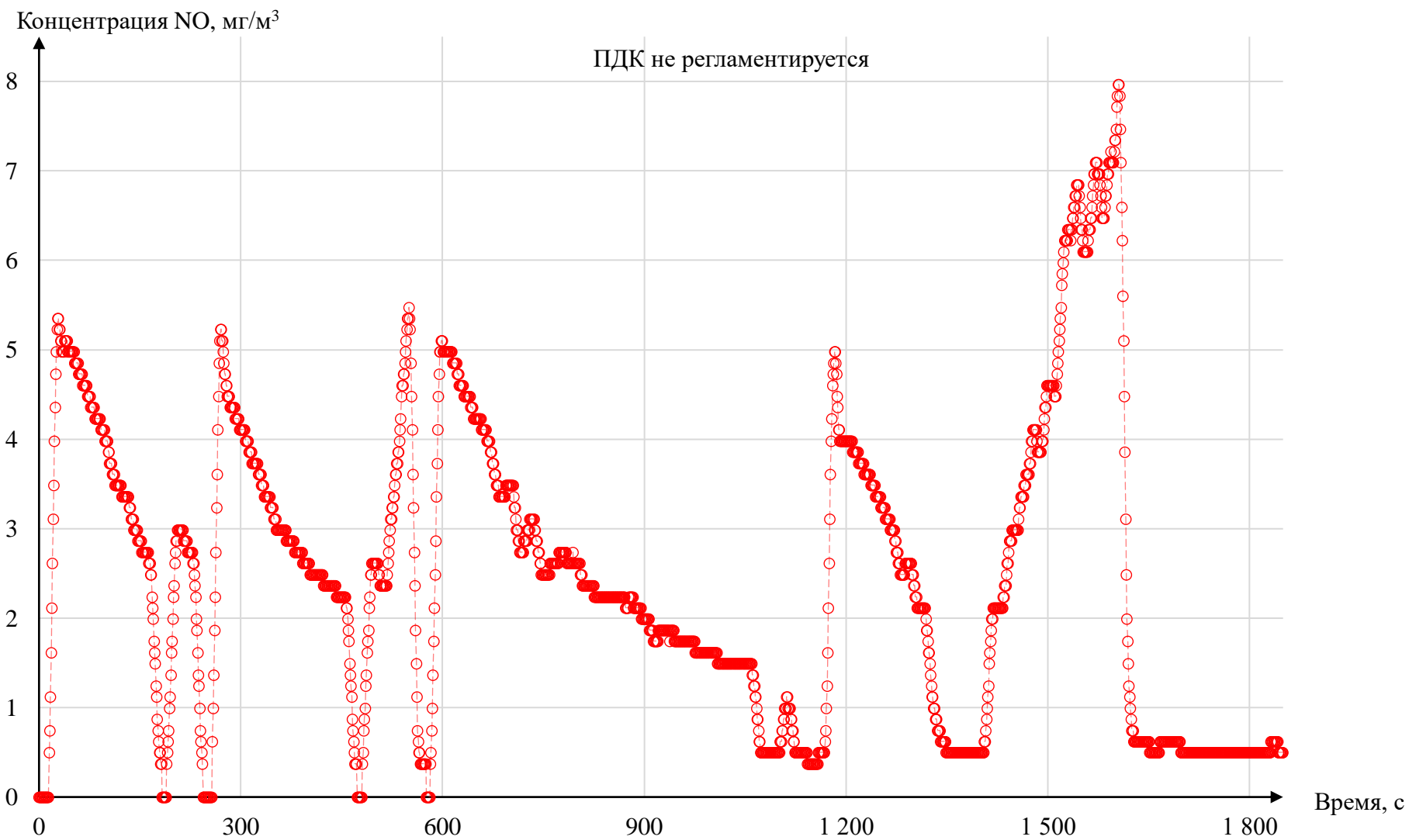
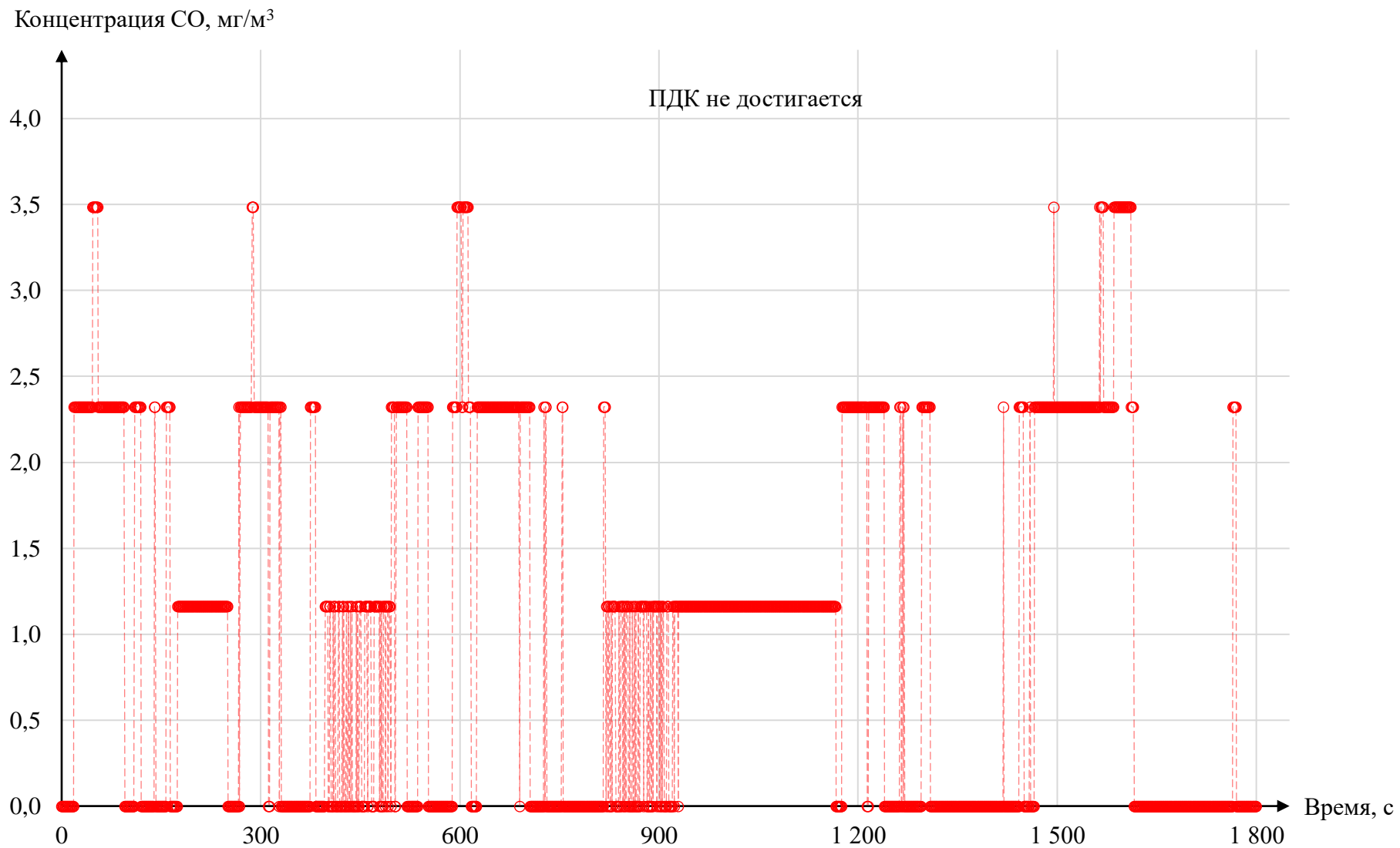
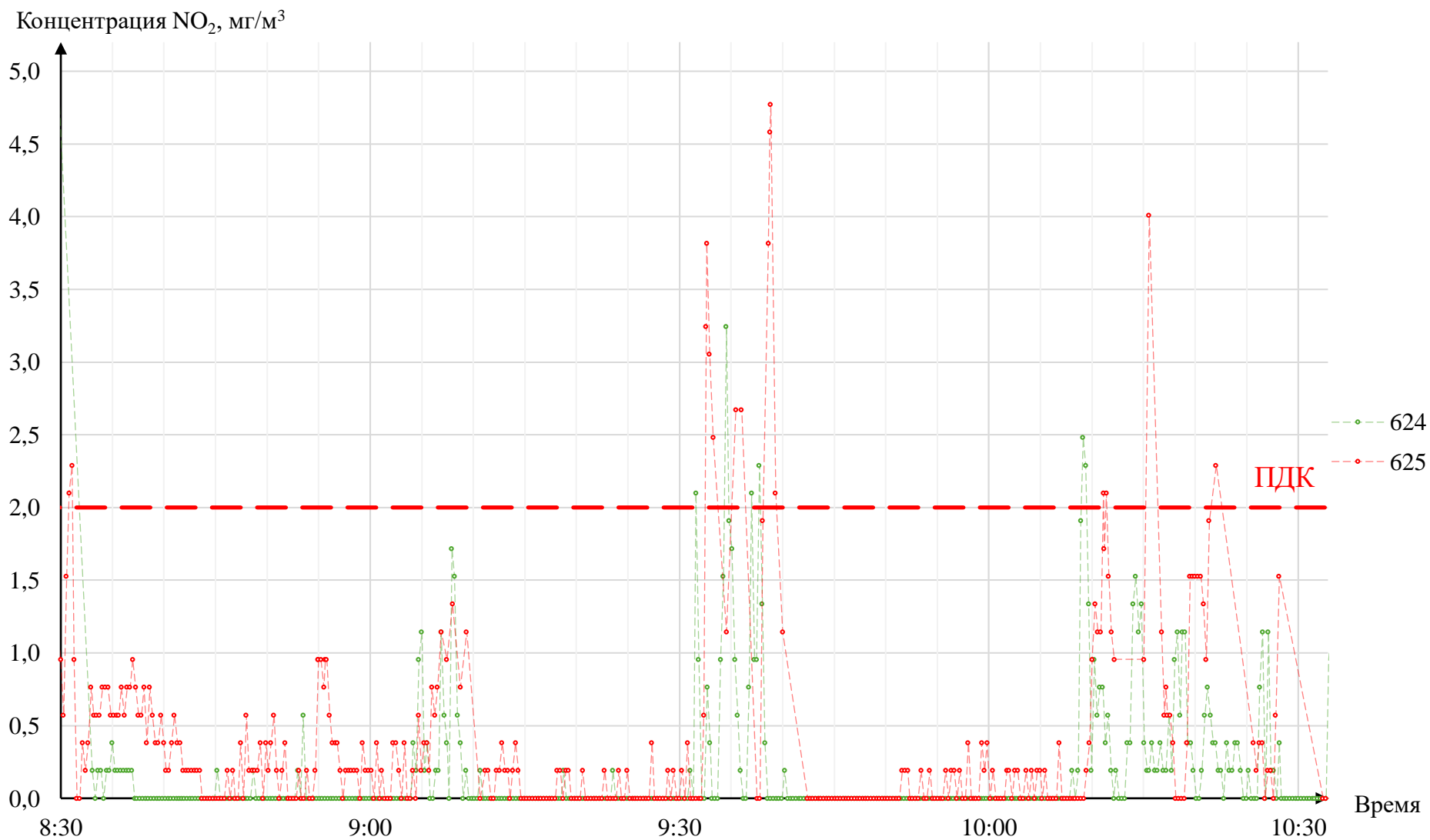
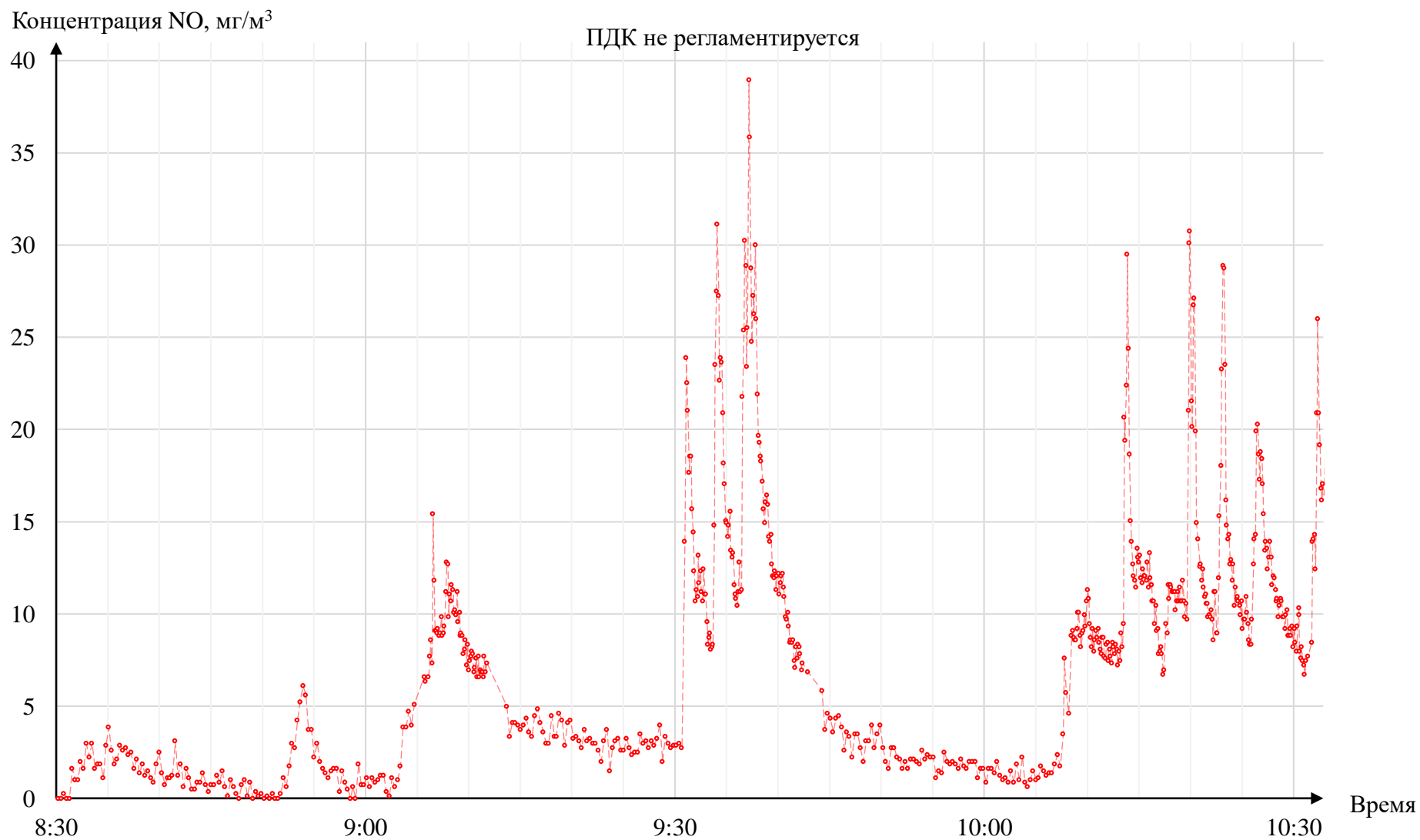


Рисунок П.19 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 11\_7-1 подземного рудника «Октябрьский»

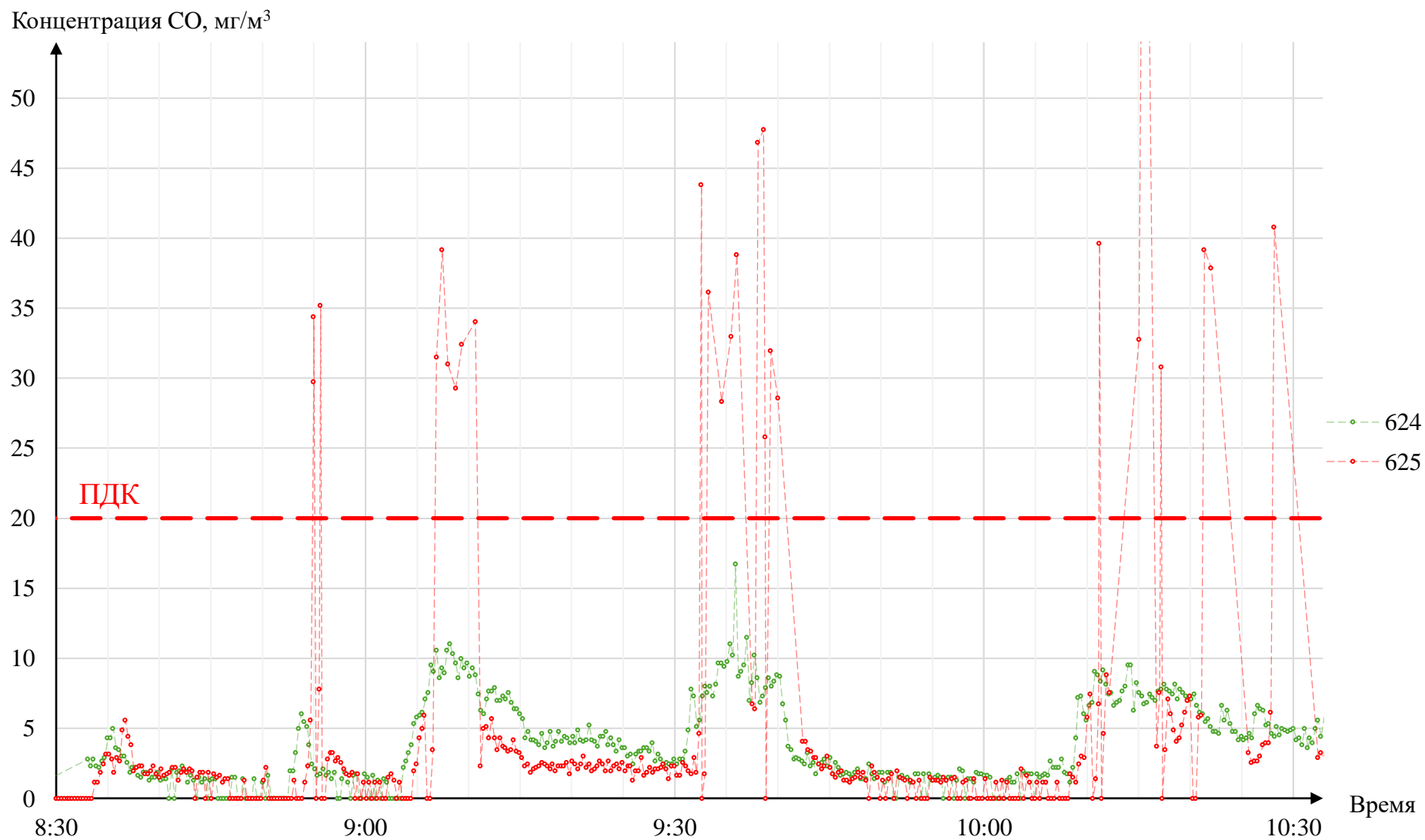




**Рисунок П.21 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский»**



**Рисунок П.22 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский»**



**Рисунок П.23 – Результаты измерений временной динамики концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере КАМ-12\_15-2 (2ст.) подземного рудника «Октябрьский»**

Концентрация NO<sub>2</sub>, мг/м<sup>3</sup>

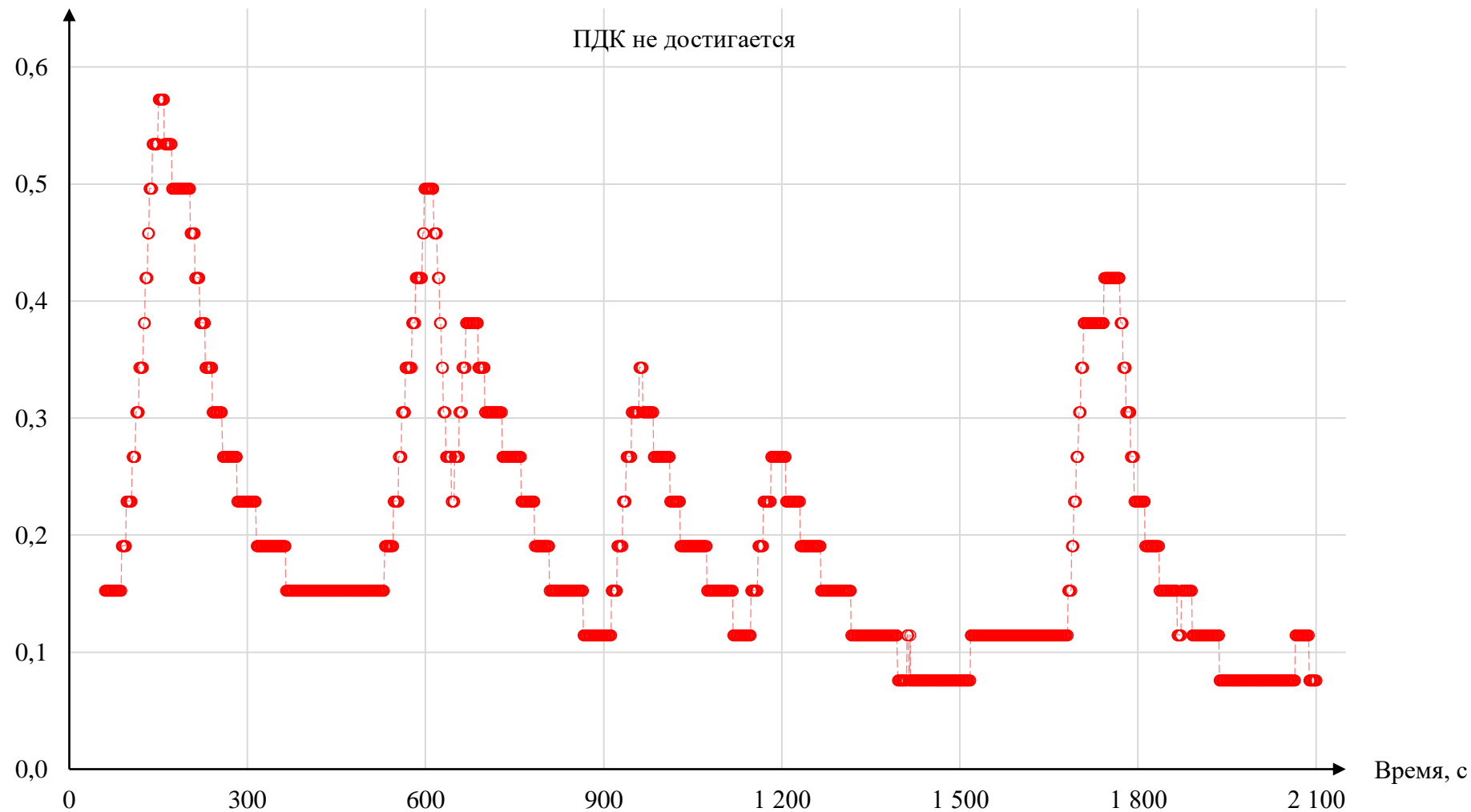


Рисунок П.24 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO<sub>2</sub> на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый»

Концентрация NO, мг/м<sup>3</sup>

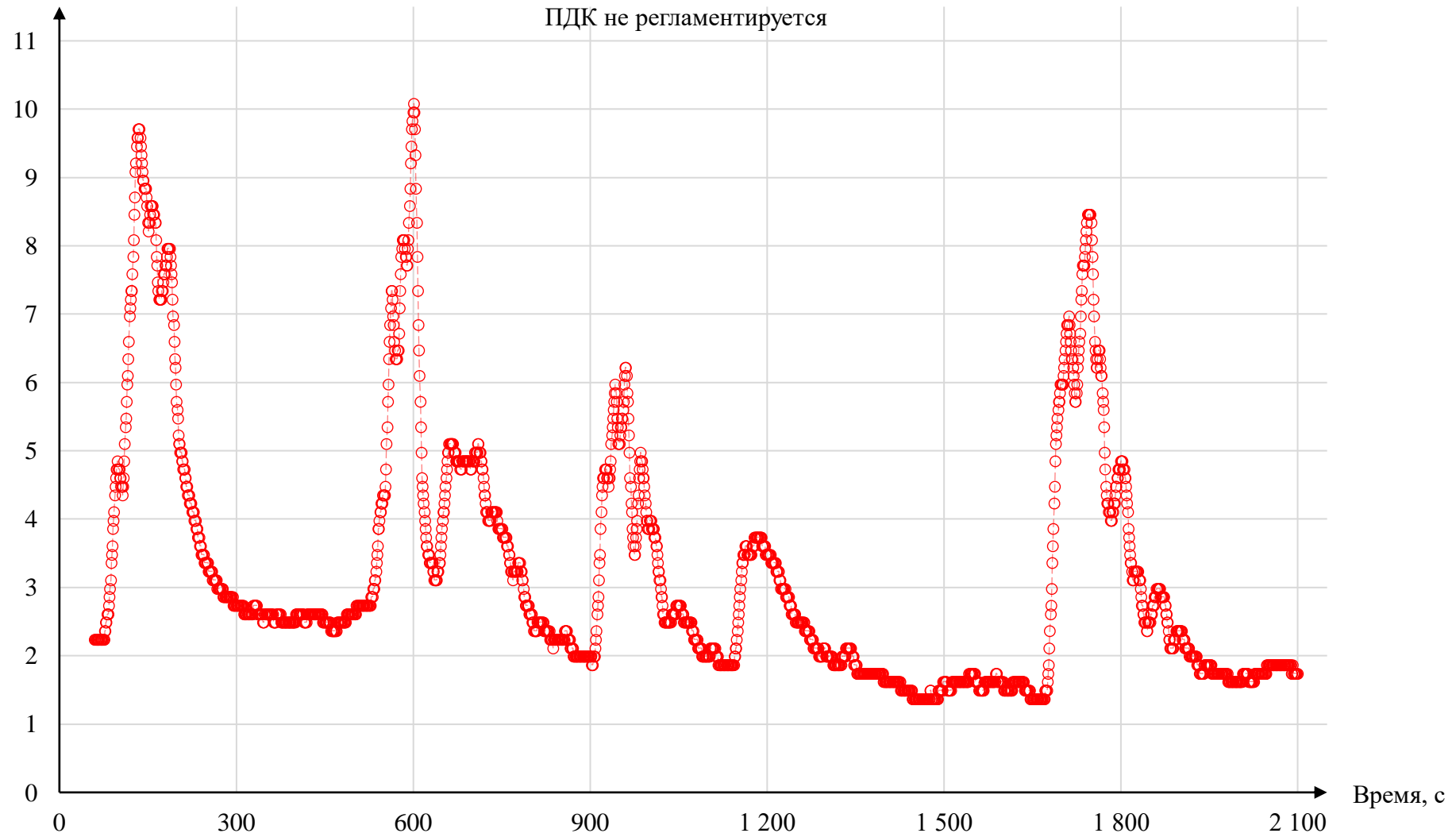


Рисунок П.25 – Результаты измерений временной динамики концентрации NO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый»

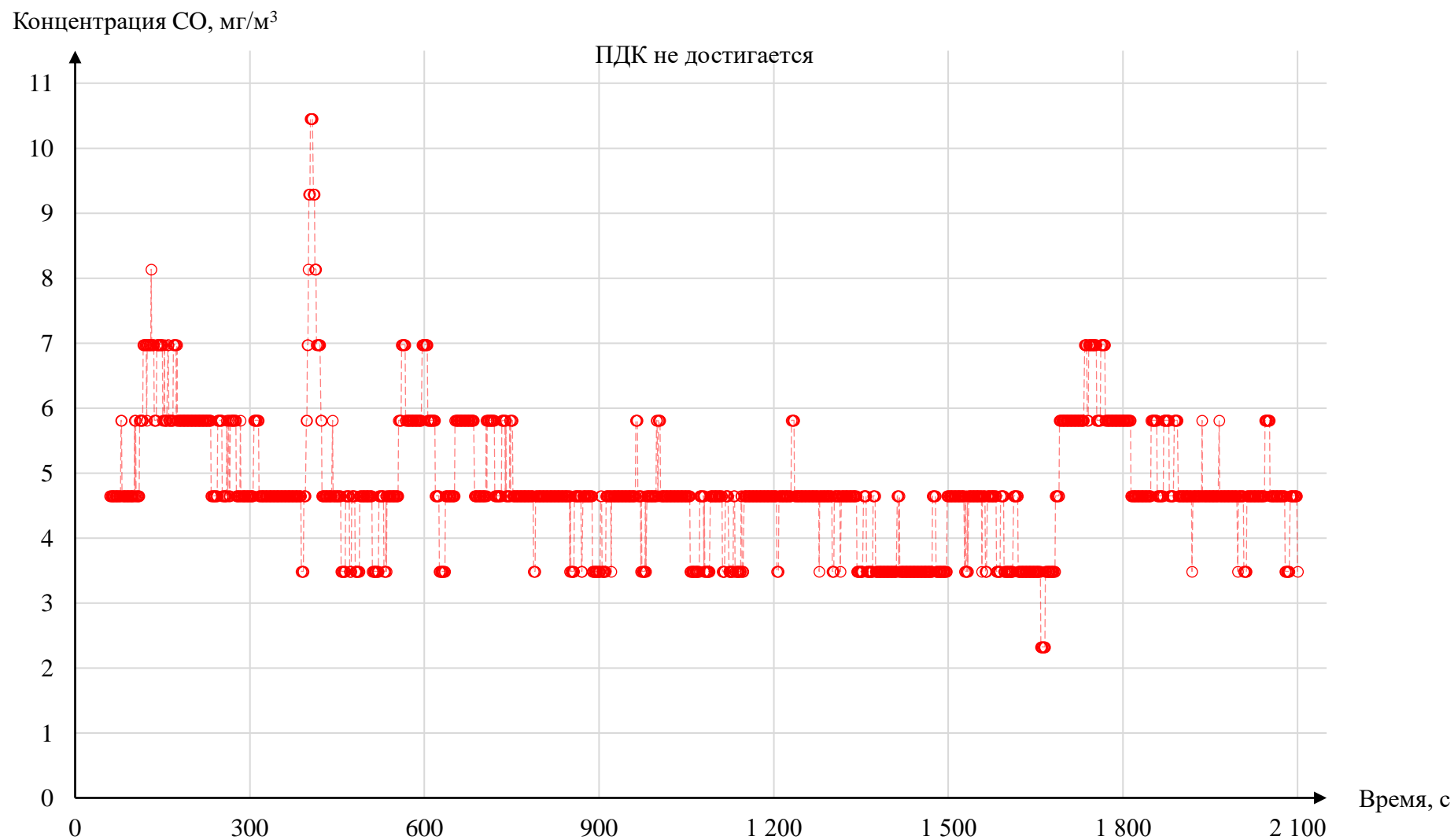


Рисунок П.26 – Результаты измерений временной динамики концентрации CO на рабочем месте машиниста ПДМ в очистной камере 3-17-1 подземного рудника «Скалистый»