

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

# **Исследование и разработка мер по снижению шума на путях его распространения от ГРП**

Научный руководитель

Тупов В.Б.

д.т.н., профессор каф. ТЭС

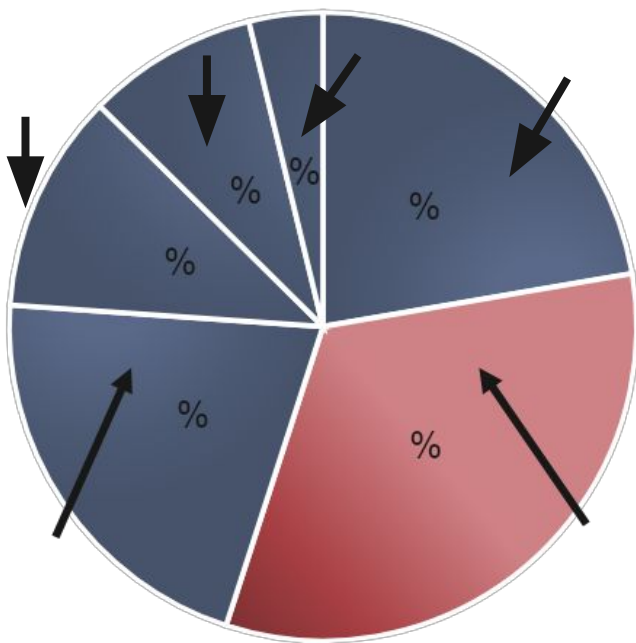
Кузьминова С.А.

аспирант каф. ТЭС

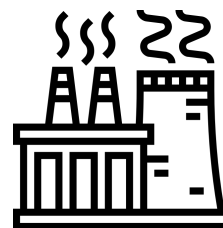
30 сентября 2021

# Шум – один из основных антропогенных факторов воздействия на человека

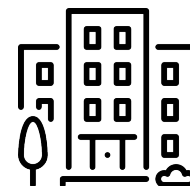
Структура жалоб населения  
на физические факторы воздействия\*



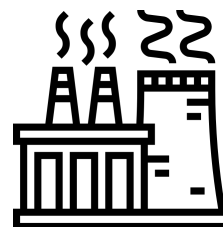
Шум от газорегуляторного пункта



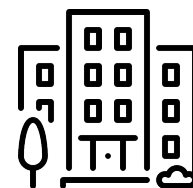
> 110 дБА



Санитарные нормы шума



< 80 дБА



\* Государственный доклад Роспотребнадзора РФ в 2020 году

# Цели и задачи диссертации



**Цель работы** – исследование и разработка мер по снижению шума на путях его распространения от ГРП и газопроводов после него

## ЗАДАЧИ

- 1 Анализ нормативно-правовых основ в области шумоглушения для оценки наличия механизмов управления и внедрения мероприятий по шумоглушению на производственных предприятиях
- 2 Определение геометрических размеров акустических экранов вокруг ГРП и газопроводов после него, необходимых для достижения максимальной эффективности экрана при минимальной высоте
- 3 Определение области эффективности использования акустических экранов для снижения шума от газопроводов после ГРП
- 4 Исследование влияния технологических проемов на акустическую эффективность экрана
- 5 Разработка метода расчета по нахождению минимальных удельных дисконтированных затрат для снижения шума от газопровода с помощью совместного использования акустических экранов и звукоизоляции

- ☑ Определена область эффективности использования акустических экранов для снижения шума от газопроводов после газорегуляторного пункта. Определены основные параметры акустических экранов вокруг ГРП и газопроводов после него для достижения максимальной эффективности
- ☑ Определено влияние размеров технологических проемов на снижение акустической эффективности экранов вокруг ГРП и получена зависимость направления излучения шума через технологические проемы в акустических экранах от ГРП
- ☑ Разработан метод расчета минимальных удельных дисконтированных затрат для снижения шума от газопровода с помощью совместного использования акустических экранов и звукоизоляции газопроводов

# Практическая значимость диссертации и внедрение её результатов



-  Разработаны рекомендации по определению основных параметров акустических экранов вокруг ГРП и газопроводов после него для достижения максимальной эффективности. Построены трехмерные графики зависимости акустической эффективности экрана от его высоты и расстояния от экрана до расчетной точки при фиксированном расстоянии от ГРП до экрана
-  Разработаны рекомендации по определению размеров технологических проемов, влияющих на снижение акустической эффективности экранов вокруг ГРП, и по расчету направленности излучения шума через технологические проемы в акустических экранах от ГРП
-  Разработаны и внедрены мероприятия по снижению шума до санитарных норм при одновременном использовании акустических экранов и звукоизоляции газопроводов
-  Предложен для практического применения метод определения минимальных удельных дисконтированных затрат на внедрение мероприятий по снижению шума при одновременном использовании акустических экранов и звукоизоляции газопроводов

**27** нормативных документов, регламентирующих распространение шума

## Классификация, нормирование и измерение шума

**ГОСТ 23337 – 2014**

Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий

**СП 51.13330.2011**

Защита от шума.  
Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003

**СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96**

Шум на рабочих места, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки

**СанПиН 1.2.3685-21**

Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и безвредности для человека факторов среды обитания

# Особенности распространения шума от ГРП и газопроводов после него

- ☑ Максимальное значение шума от ГРП приходится на высокие частоты, особенно 1000 Гц и 2000 Гц
- ☑ Значения уровней звука на входе газопровода в здание ГРП и на выходе могут отличаться на 20 дБА
- ☑ ГРП рассматривается как точечный источник шума в месте выхода газопровода из здания
- ☑ Шум от газопровода уменьшается по мере удаления от здания ГРП. Первые 100-200 м газопровода имеют сильное излучение
- ☑ Газопровод по длине располагается на разной высоте над землей
- ☑ Газопровод рассматривается как линейный источник шума с переменными шумовыми характеристиками по длине



# Результаты измерений

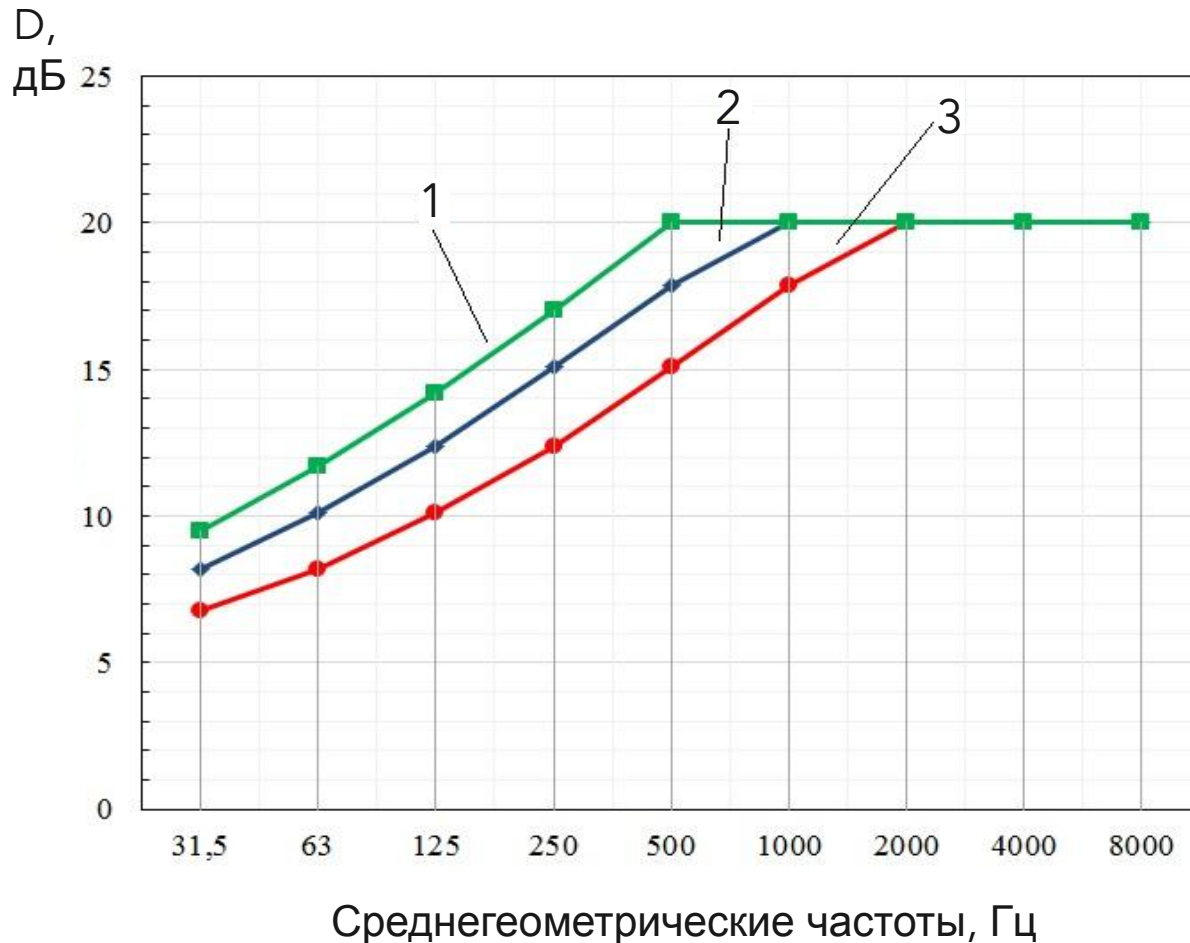


## Объекты:

ПАО «Мосэнерго»  
 ООО «ТСК Мосэнерго»  
 ООО «Калининградская генерация»

| Точки измерений              | Уровень звука, дБА | Уровни звукового давления, дБ<br>на среднегеометрических частотах, Гц |      |      |      |      |       |       |       |      |
|------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
|                              |                    | 31,5                                                                  | 63   | 125  | 250  | 500  | 1000  | 2000  | 4000  | 8000 |
| Доп. нормы для рабочих зон   | 80                 | 107                                                                   | 95   | 87   | 82   | 78   | 75    | 73    | 71    | 69   |
| ООО «ТСК Мосэнерго»          |                    |                                                                       |      |      |      |      |       |       |       |      |
| Помещение внутри ГРП         | 113,4              | 73,9                                                                  | 71,6 | 73,8 | 84,2 | 98,0 | 107,9 | 108,6 | 106,4 | 93,4 |
| превышение                   | 33,4               | -                                                                     | -    | -    | 2,2  | 20,0 | 32,9  | 35,6  | 35,4  | 24,4 |
| расширенная неопределенность | 0,7                | 0,8                                                                   | 0,8  | 0,8  | 0,9  | 0,8  | 0,8   | 0,9   | 0,8   | 0,8  |
| Газопровод на выходе из ГРП  | 94,1               | 81,5                                                                  | 77,9 | 73,9 | 75,9 | 83,1 | 89,9  | 88,7  | 85,7  | 72,6 |
| превышение                   | 14,1               | -                                                                     | -    | -    | -    | 5,1  | 14,9  | 15,7  | 14,7  | 3,6  |
| расширенная неопределенность | 0,8                | 0,8                                                                   | 0,7  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8   | 0,9   | 0,8   | 0,8  |
| Газопровод по длине          | 92,8               | 84,1                                                                  | 81,3 | 73,3 | 73,4 | 80,4 | 88,9  | 87,6  | 83,5  | 69,9 |
| превышение                   | 12,8               | -                                                                     | -    | -    | -    | 2,4  | 13,9  | 14,6  | 12,5  | 0,9  |
| расширенная неопределенность | 0,8                | 0,8                                                                   | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8   | 0,8   | 0,8   | 0,8  |

# Затухание шума от экрана в зависимости от его высоты

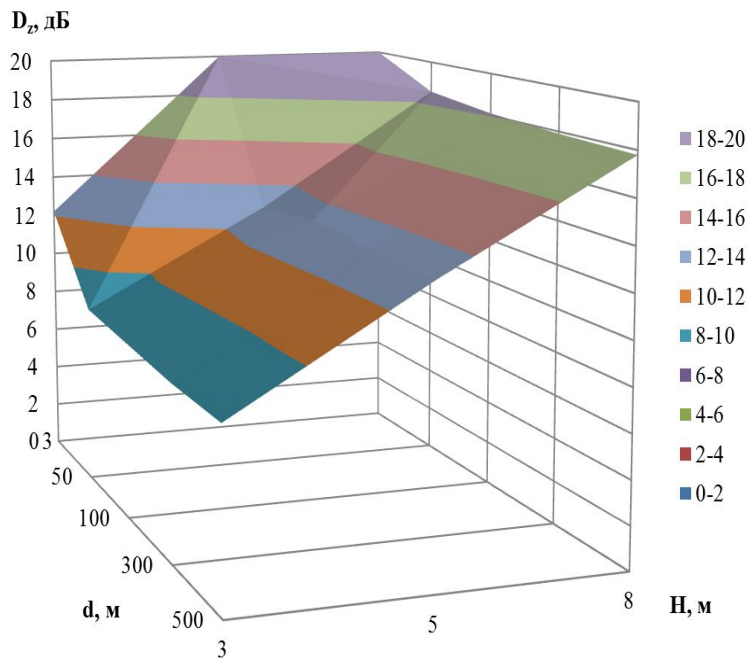


- Высота акустического экрана:  
1 - 10 м; 2 - 8 м; 3 - 6 м
- Высота расчетной точки: 1,5 м
- Высота источника шума: 1,5 м
- Расстояние между расчетной точкой и экраном: 300 м

# Затухание шума в зависимости от высоты экрана и расстояния до расчётной точки при $f=500$ Гц (А) и $f=1000$ Гц (Б)

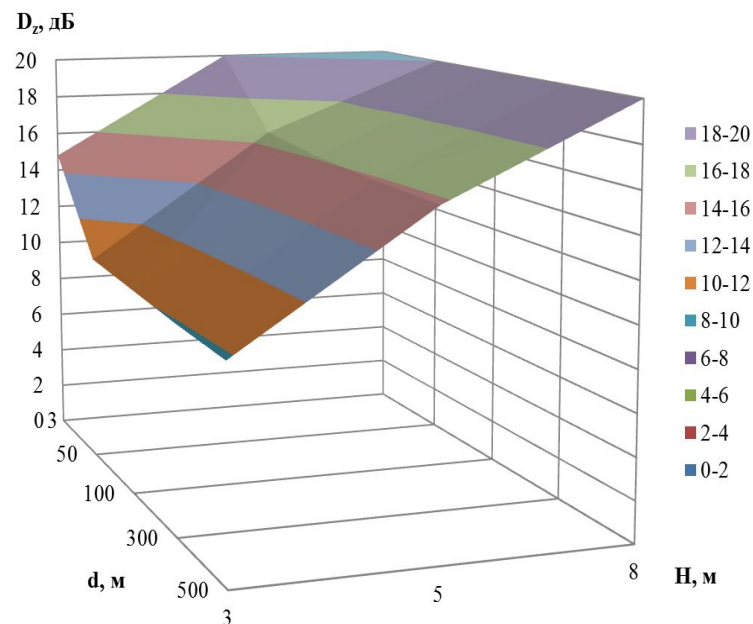


## А



- Высота экрана: 3, 5, 8 м
- Высота источника шума и расчетной точки: 1,5 м

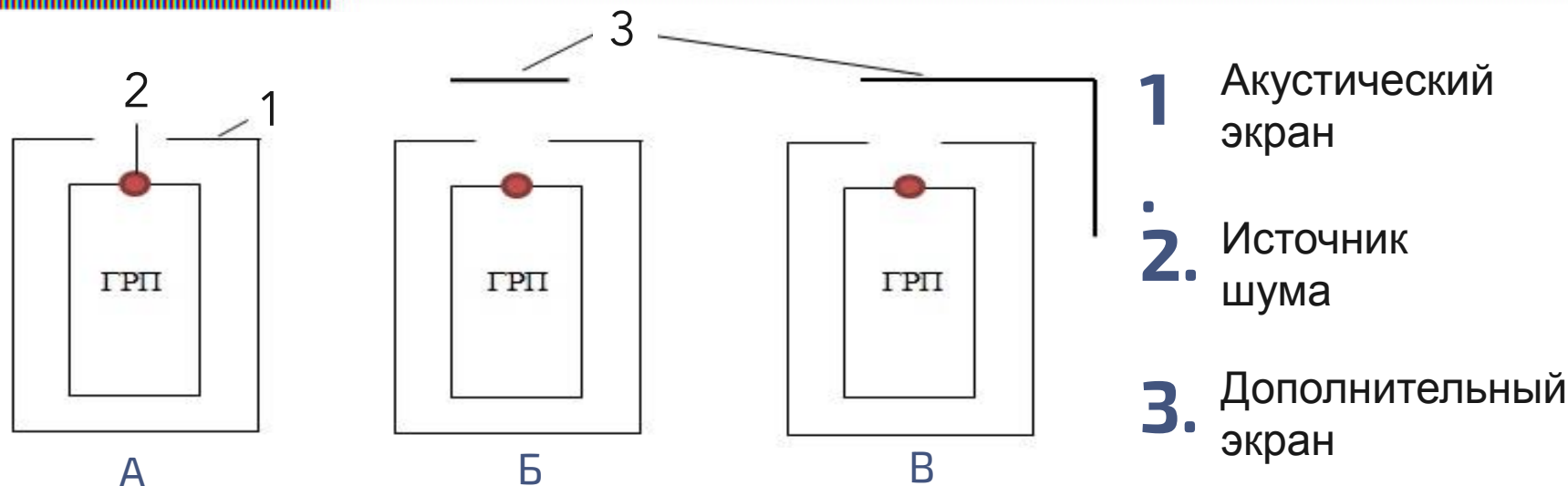
## Б



- Расстояние от ГРП до экрана: 10 м
- Расстояние от экрана до расчетных точек: 3, 50, 100, 300 и 500 м

Высота экрана для достижения 20 дБ при 1000 Гц должна быть не менее 7,4 м

# Варианты расположения акустических экранов при наличии технологических проемов



**А** Прорез имеет место в одной из сторон периметра вокруг ГРП

**Б** Напротив прореза устанавливается дополнительно прямой акустический экран

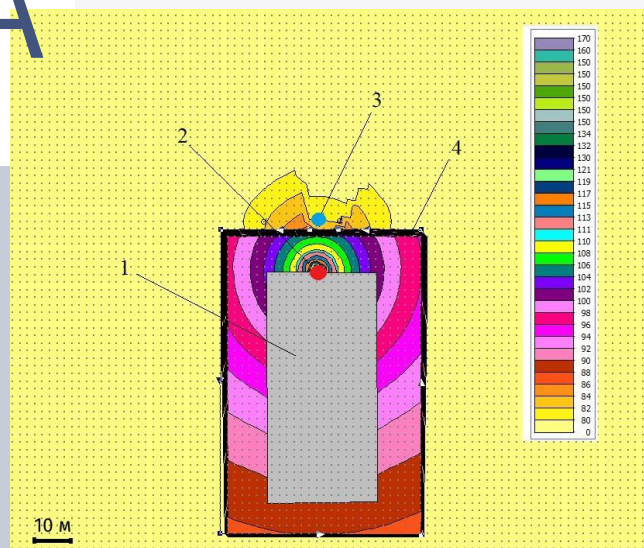
**В** Напротив прореза устанавливается дополнительно Г-образный акустический экран

- Высота экрана: 5 м
- Высота источника шума: 1,5 м
- Расстояние ГРП до экрана: 10 м
- Ширина технологического проема: 2 м и 6 м

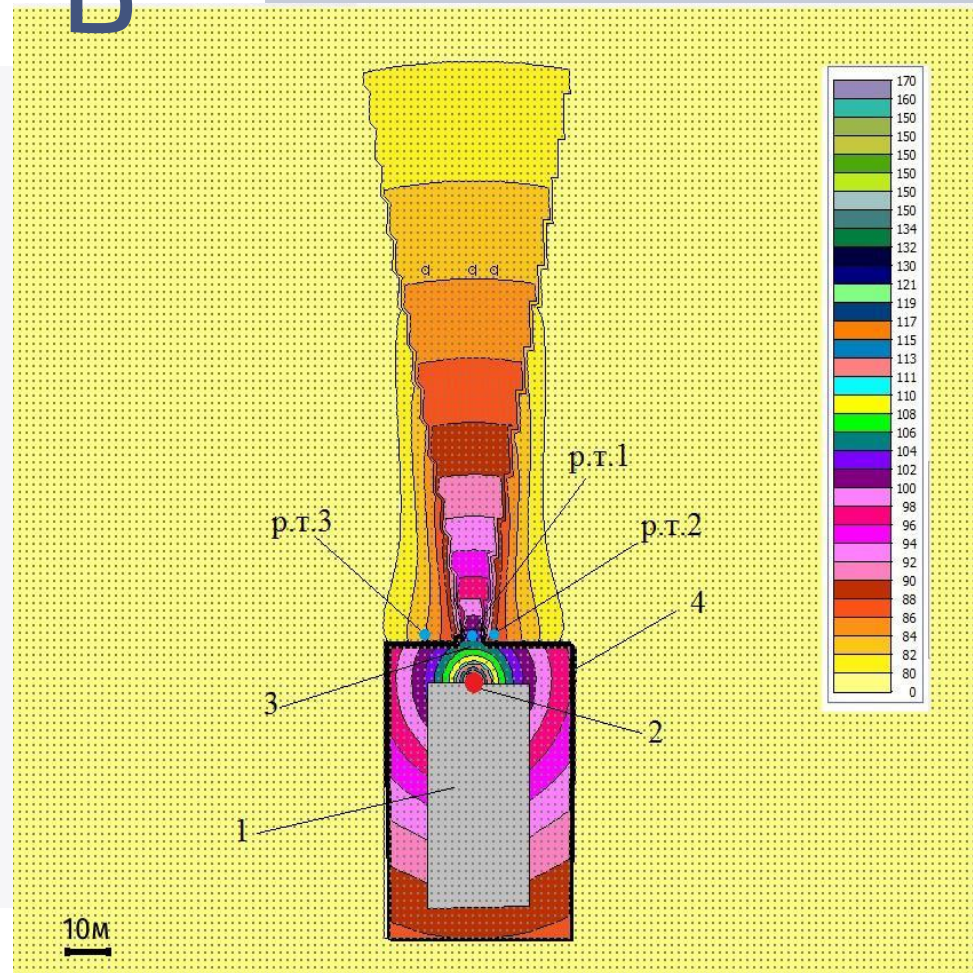
# Изолинии уровней звука при отсутствии (А) и наличии (Б) технологического проема в экране

- 1 ГРП
- 2 Точка выхода газопровода из здания
- 3 Расчетная точка (РТ) у экрана
- 4 Акустический экран

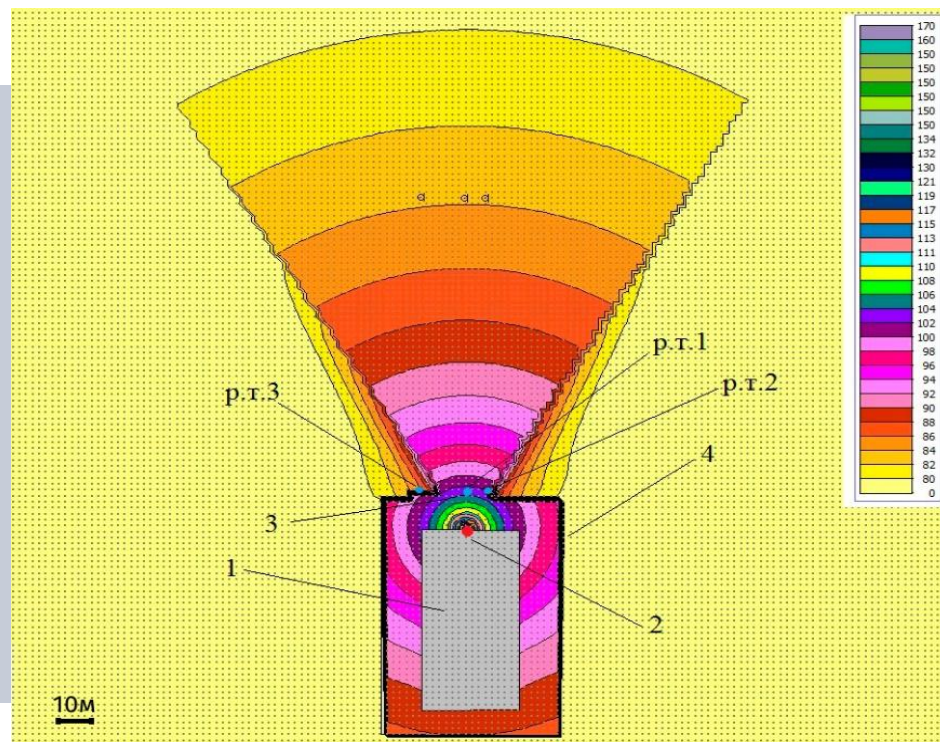
А



Б



# Изолинии уровней звука при наличии технологического проема в экране шириной 6 м



- р.т.1 - напротив середины проема  
р.т.2 - на расстоянии 3 м справа от центра проема  
р.т.3 - на расстоянии 7 м от центра проема

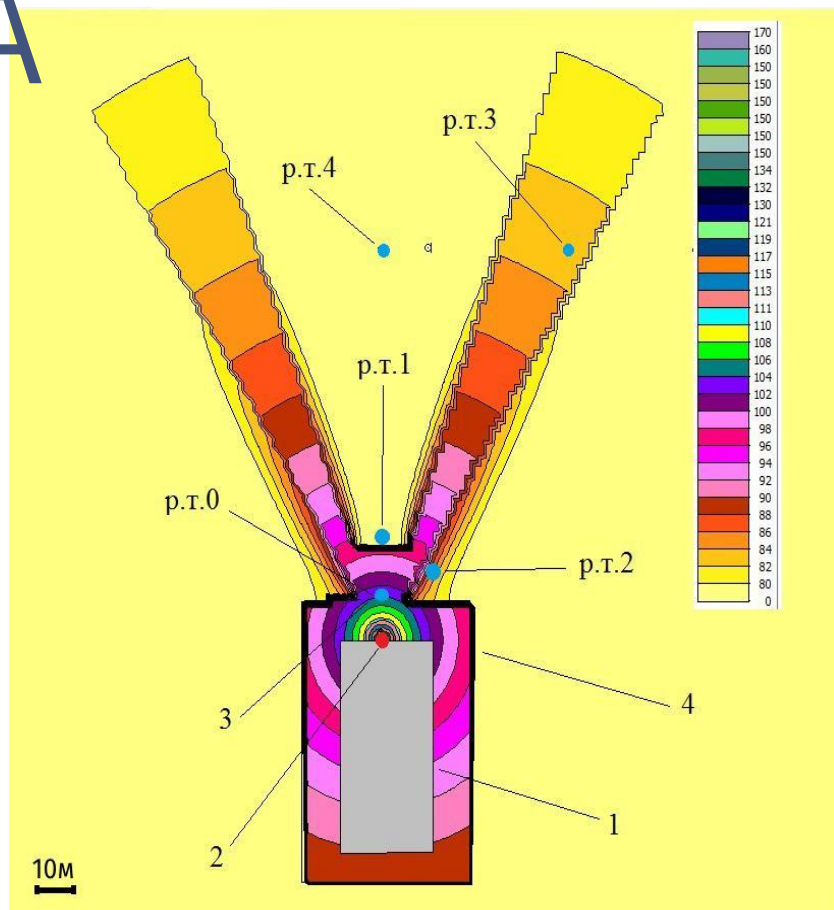
Изменение излучения шума в зависимости от ширины проема



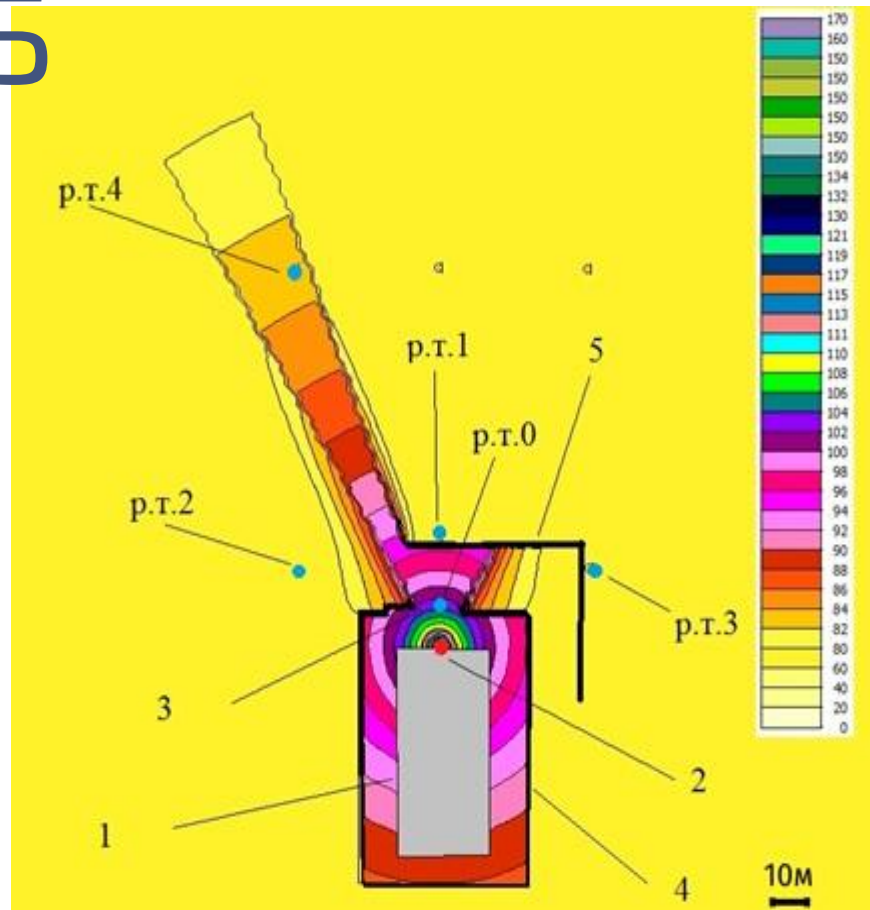
# Изолинии уровней звука при наличии дополнительного прямого (А) и Г-образного (Б) экрана напротив проема

- 1 ГРП 2 Точка выхода газопровода 3 Расчетная точка у экрана 4 Акустический экран

А

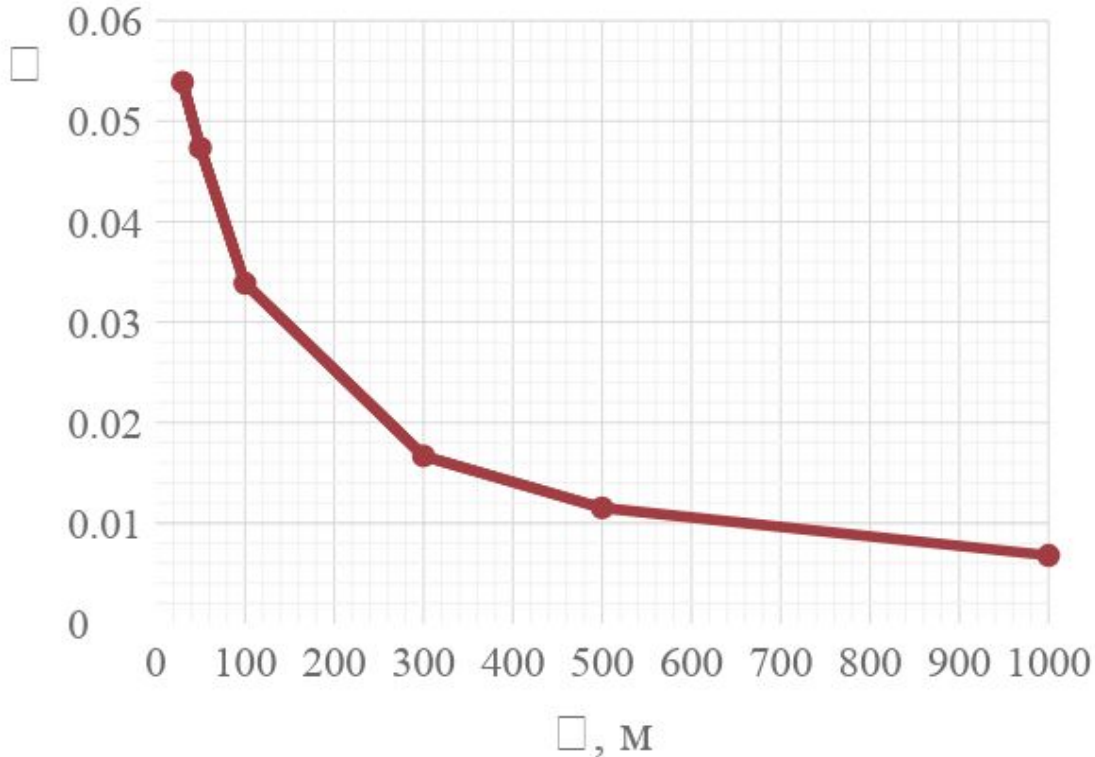


Б



# Определение коэффициента $k$ , который характеризует снижение уровня шума по длине газопровода

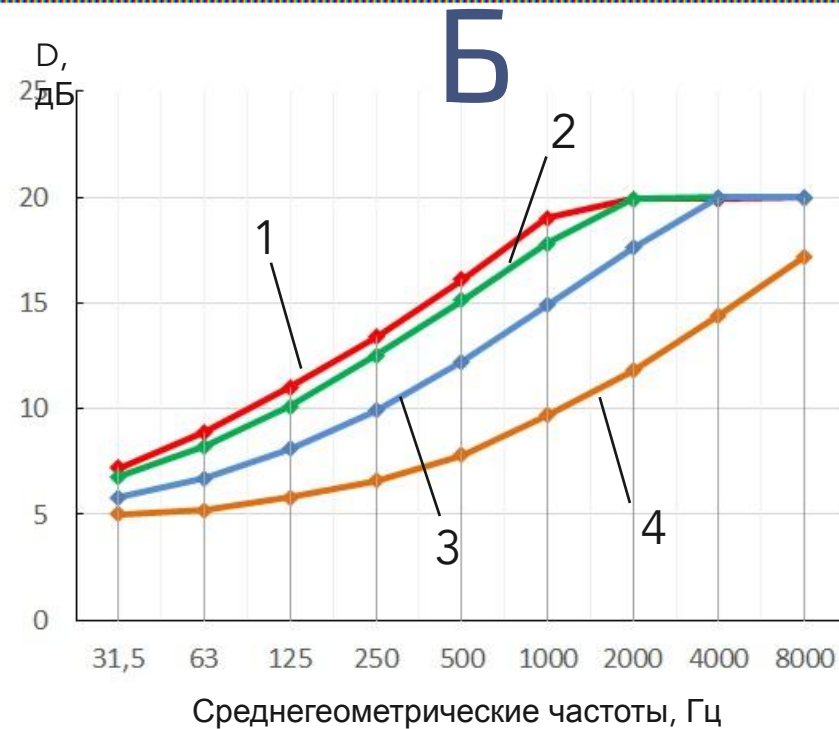
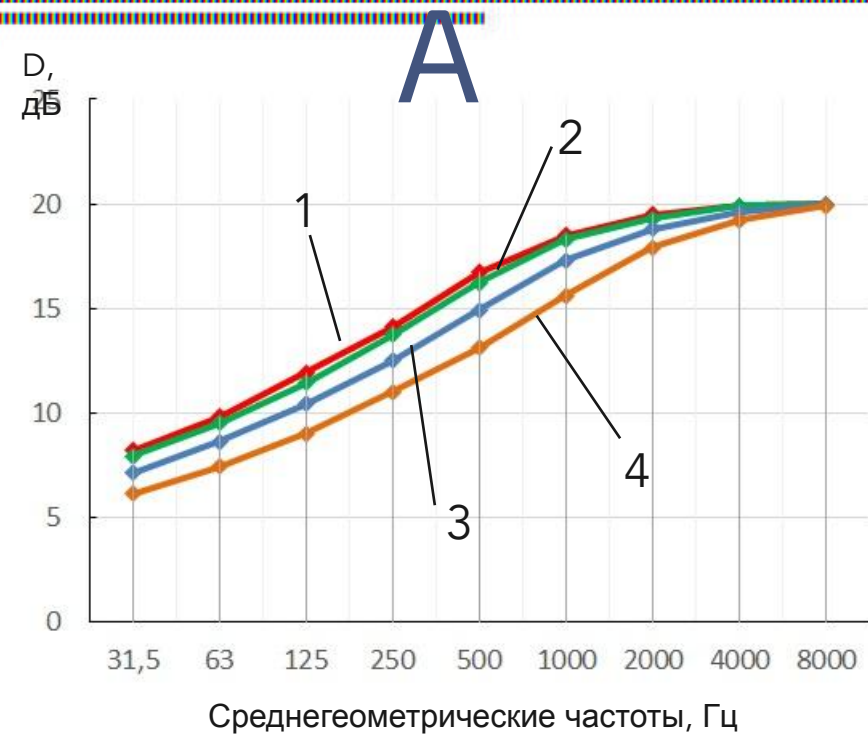
$$(1) \quad \rho_e^2(\varepsilon, N) = \frac{\rho c W_0}{4\pi R} \left( e^{-kl} \arctg\left(\frac{l}{R}\right) + \arctg\left(\frac{\varepsilon}{R}\right) [1 - e^{-kl}] \right)$$



$$(2) \quad \Delta L = 14,7 \lg\left(\frac{l}{10}\right)$$

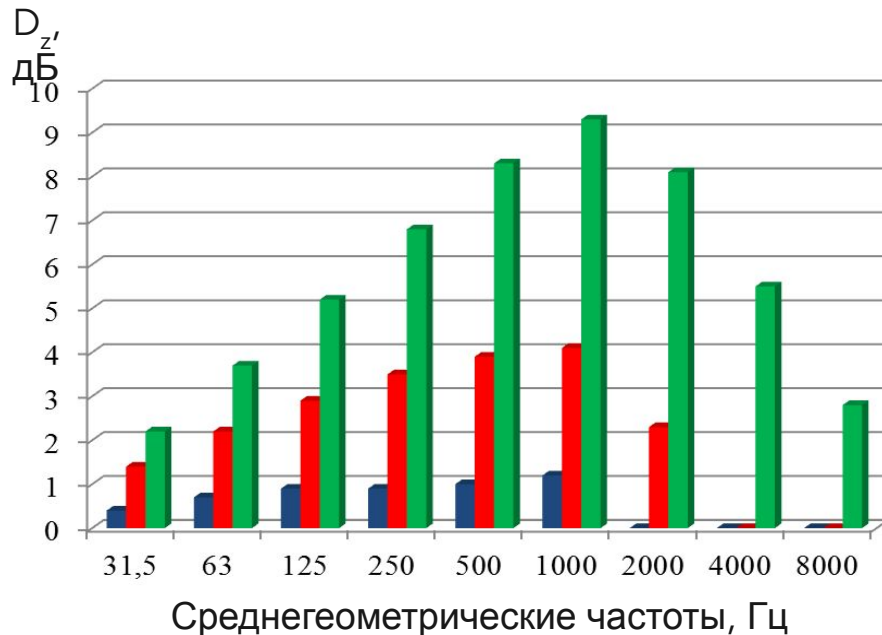
$$(3) \quad k = \frac{3,387}{l} \lg\left(\frac{l}{10}\right)$$

# Затухание шума от акустического экрана на расстоянии 3 м (А) и 300 м (Б)



- Высота экрана: 10 м
- Расстояние между осью газопровода и экраном: 3 м
- Длина газопровода: 600 м
- Высота прохождения газопровода: 1.5 м (1); 3 м (2); 5 м (3); 8 м (4)

# Затухание шума на экране при разных высотах прохождения газопровода



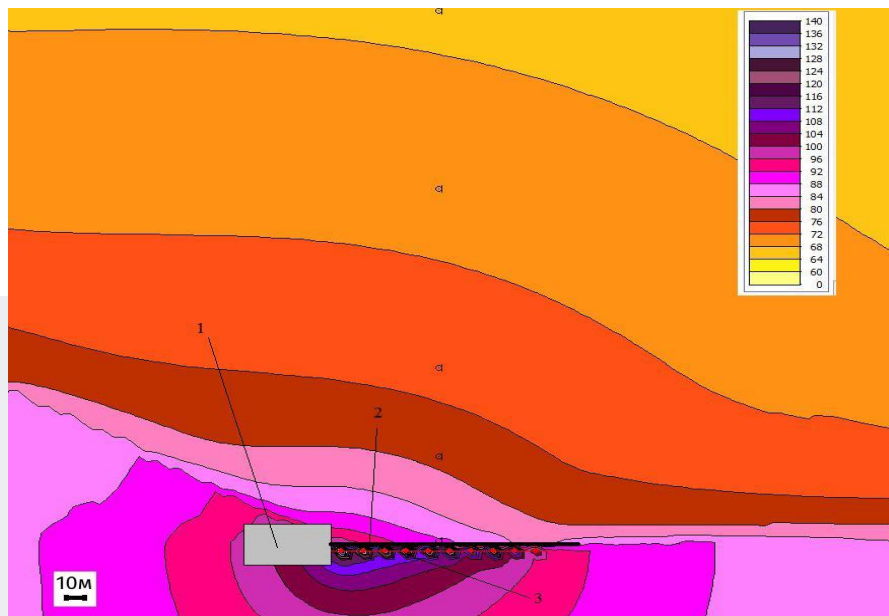
- А** Расстояние от газопровода до кромки экрана 0,5 м
- Б** Расстояние от газопровода до кромки экрана 1,5 м
- В** Расстояние от газопровода до кромки экрана 2,5 м

- Минимальная высота газопровода: 1,5 м
- Высота экрана: 2, 3 и 4 м

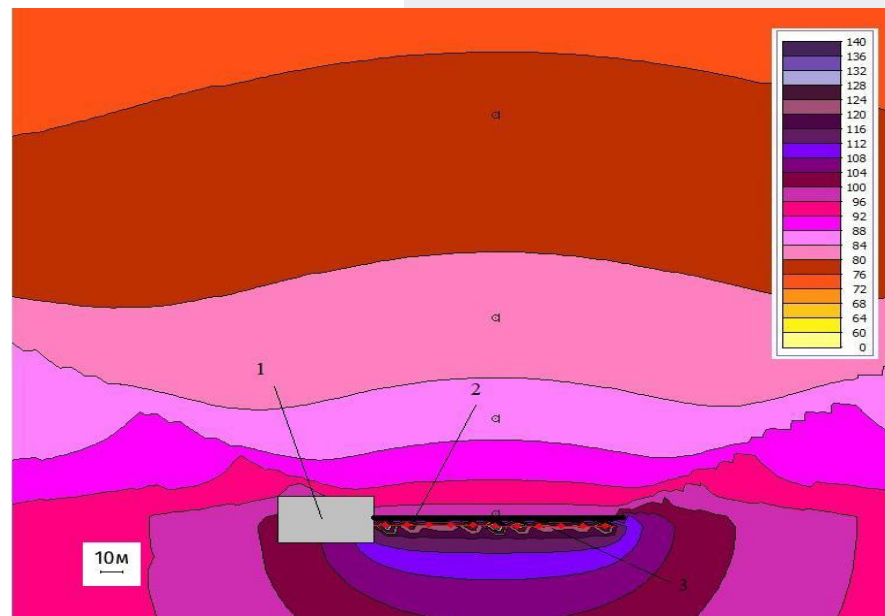
Использование экрана при расстоянии меньше 2,5 м от оси газопровода до кромки экрана малоэффективно

# Изолинии уровня звука от газопровода с переменными (А) и постоянными (Б) шумовыми характеристиками по длине

А



Б



- Длина газопровода: 100 м
- Высота экрана: 5 м
- Расстояние от экрана до оси газопровода: 3 м
- Высота прохождения газопровода: 1,5 м
- Газопровод разбит на десять линейных источников шума длиной 10 м каждый

# Новый метод минимума суммарных дисконтированных затрат

$З_d$  - суммарные дисконтированные затраты

$$(1) \quad З_d = З_1 + З_2 \rightarrow \min$$

$$(2) \quad З_d = f(\Delta L_{\text{экр}}; \Delta L_{\text{об}})$$

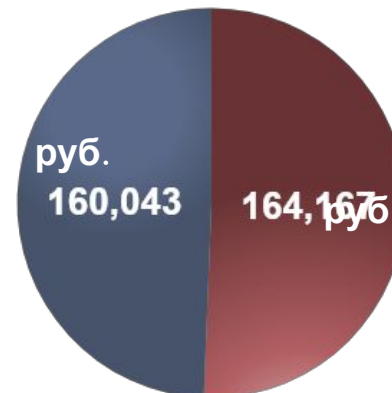
$$З_1 = f(\Delta L_{\text{экр}}) \text{ и } З_2 = f(\Delta L_{\text{об}})$$

дисконтированные затраты на шумоглушение при использовании экрана и звукоизоляции

$$r_{\text{экр}} = \frac{\partial З_1}{\partial \Delta L_{\text{экр}}} \text{ и } r_{\text{об}} = \frac{\partial З_2}{\partial \Delta L_{\text{об}}}$$

удельные дисконтированные затраты на единицу снижения шума с помощью экрана и звукоизоляции газопровода

$$(3) \quad r_{\text{экр}} = r_{\text{об}}$$



- Затраты на единицу снижения шума с помощью экрана
- Затраты на единицу снижения шума с помощью звукоизоляции

# Формула для определения экономических потерь на 1 дБА



При  $r_{\text{экр}} \neq r_{\text{об}}$

$$\Delta Z = 10 \lg \left[ \left( \frac{2r_{\text{экр}}}{r_{\text{экр}} + r_{\text{об}}} \right)^{r_{\text{экр}}} * \left( \frac{2r_{\text{об}}}{r_{\text{экр}} + r_{\text{об}}} \right)^{r_{\text{об}}} \right] \quad (1)$$

При  $r_{\text{экр}} = r_{\text{об}}$

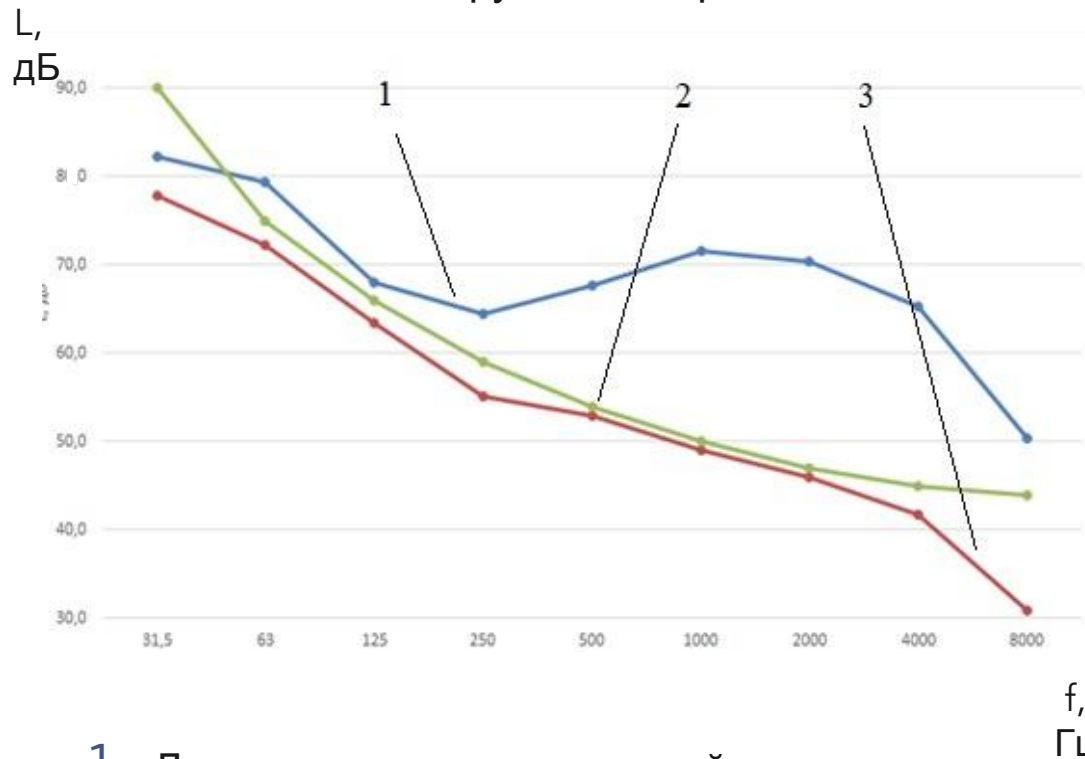
$$\Delta Z = 0 \quad (2)$$

- при отношении в 5% удельных затрат на экранирование и изоляцию  $\Delta Z = 0,99r_{\text{об}}$
- при отношении в 15%  $\Delta Z = 5,15r_{\text{об}}$
- при отношении в 30%  $\Delta Z = 16,62r_{\text{об}}$
- при увеличении отношения до 50%  $\Delta Z = 40,1r_{\text{об}}$

# Снижение шума на РТС с помощью комплекса акустических мероприятий



Измерение уровней звукового давления  
в окружающем районе



- 1 До проведения мероприятий
- 2 Дневные санитарные нормы для окружающего района
- 3 После проведения мероприятий

УТВЕРЖДАЮ:

И.О. Главного инженера

ООО «ТСК Мосэнерго»

Гремякин А.И.

« 01 » 2021г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается использование метода распределения минимальных удельных затрат на снижение шума от газорегуляторного пункта и газопровода после него с помощью совместного использования акустических экранов и звукоизоляции газопровода при осуществлении мероприятий по шумоглушению на ООО «Теплоснабжающая компания Мосэнерго» Химкинский филиал.

Мероприятия по шумоглушению разработаны НОЦ «Снижение шума энергетического оборудования» при участии диссертанта Кузьминой С.А. в процессе подготовки кандидатской диссертации на тему «Исследование и разработка мер по снижению шума на путях его распространения от ГРП» под научным руководством д.т.н., профессора Тупова В.Б.

От ООО «ТСК Мосэнерго»

Киселев П.И.

# Выводы (1 / 3)



1. По результатам проведенных измерений на действующих объектах энергетики превышения нормативов составляют до 33,6 дБА в помещении ГРП и на выходе газопровода из здания ГРП. Превышение уровней звука по длине газопровода составило от 3,2 дБА до 20,7 дБА на различных энергетических объектах. Показана необходимость осуществления комплекса мер по снижению шума на ТЭС от ГРП и газопроводов после него на путях распространения с помощью акустических экранов и использования звукоизоляции газопроводов.
2. Определена минимальная высота установки акустического экрана вокруг ГРП для достижения его максимальной эффективности. При этом построены трехмерные графики зависимости акустической эффективности экрана от его высоты экрана и расстояния от экрана до расчетной точки при фиксированном расстоянии от ГРП до экрана. По итогам расчетов определено, что минимальная необходимая высота экрана для получения максимального затухания шума 20 дБ на среднегеометрической частоте 1000 Гц должна быть не меньше 7,4 м при расположении расчетной точки на расстоянии 300 м от экрана и расстоянии от ГРП до экрана 10 метров, определенным в соответствии с действующими нормативами.
3. Проведено исследование влияния наличия технологических проемов на акустическую эффективность экрана вокруг ГРП. Определено, что наличие технологических проемов существенно снижает акустическую эффективность экрана. Снижение составляет 17,9 дБА рядом с экраном и 14,5 дБА при расположении расчетной точки от экрана на расстоянии 300 м от него. Определено, что увеличение размера технологического проема с 2 до 6 метров существенно снижает акустическую эффективность экрана на 12,4 дБА и 6,8 дБА в зависимости от удаления расчетной точки от центра проема.

# Выводы (2 / 3)



4. Определено изменение излучения шума вокруг технологических проемов в акустических экранах. Установлено, что ширина проема существенно изменяет направленность шума по сравнению с источником со свободным излучением. Показано, как установка дополнительных экранов различных форм меняет направленность излучения шума. Расчетами показано, что шум, который распространяется по сторонам дополнительного прямого экрана или с одной стороны Г-образного экрана, имеет ярко выраженную лучевую направленность.
5. Определен коэффициент  $k$ , который в формуле расчета уровня звукового давления характеризует снижение уровня шума по длине газопровода. Показан сложный характер зависимости этого коэффициента  $k$  от длины газопровода. Построен график зависимости снижения уровня звука по длине газопровода.
6. Доказано, что увеличение высоты прохождения газопровода приводит к уменьшению затухания экраном. Сделан вывод, что при высоте меньше 2,5 м от газопровода до верхней кромки экрана акустическая эффективность экрана крайне мала.

# Выводы (3 / 3)



7. Проведенные расчеты показали, в каких случаях для снижения шума от газопровода достаточно использование только акустического экрана, а когда необходимо использовать с акустическими экранами звукоизоляцию газопроводов.
8. Предложен новый метод, позволяющий разрабатывать мероприятия по снижению шума от газопроводов после ГРП до санитарных норм с наименьшими затратами при одновременном использовании акустических экранов и звукоизоляции газопроводов. Определено условие, когда удельные дисконтированные затраты на снижение шума от экрана и звукоизоляции будут минимальны. Показано, что увеличение разницы между удельными затратами на единицу снижения шума на установку экрана и звукоизоляцию влияет на экономический эффект от внедрения мероприятий по шумоглушению.
9. Рассчитаны удельные дисконтированные затраты для 6 длин газопроводов после ГРП и для двух диаметров трубопровода в зависимости от фирмы-производителя материала, которые в дальнейшем могут использоваться как справочные данные при выборе звукоизоляционных материалов для снижения шума от газопровода ГРП.

# Спасибо за внимание



14 публикаций {  
4 в журналах перечня ВАК  
3 в системе цитирования Scopus  
7 докладов в сборниках международных конференций

## Благодарность

д.т.н., профессору каф. ТЭС Тупову Владимиру Борисовичу

помощнику ректора Савину Никите Георгиевичу

коллективам: кафедры Тепловых электрических станций

НОЦ «Снижение шума энергетического оборудования»

моей семье и управлению охраны труда и экологии МЭИ

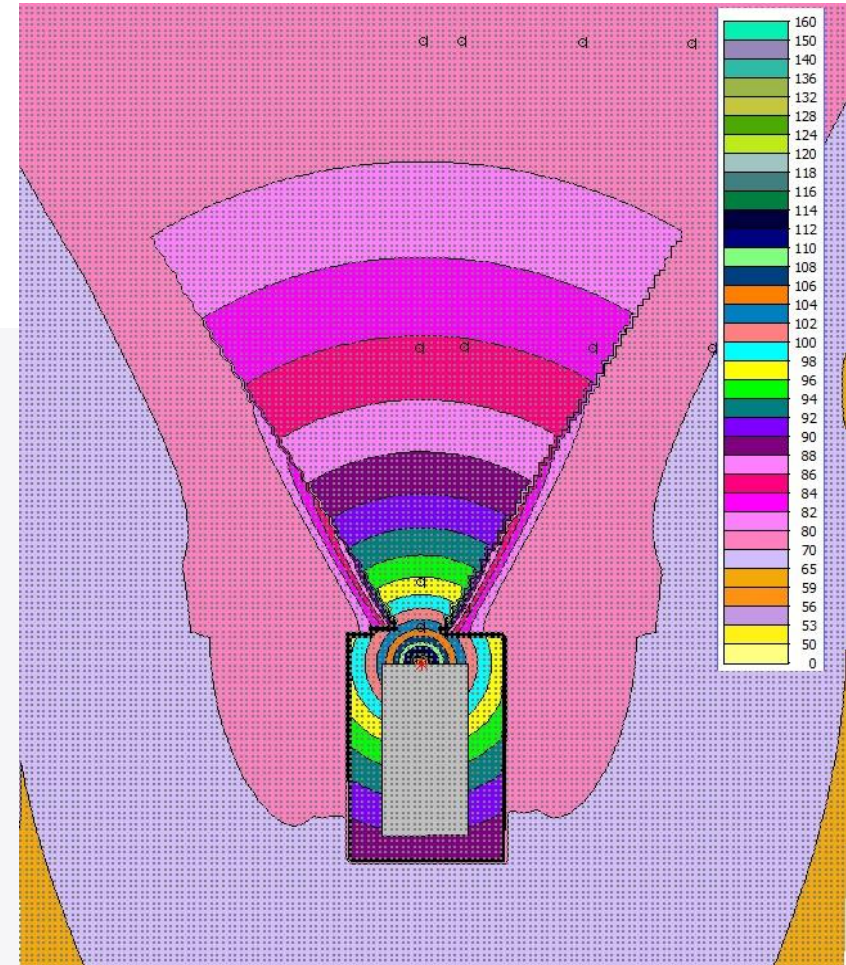
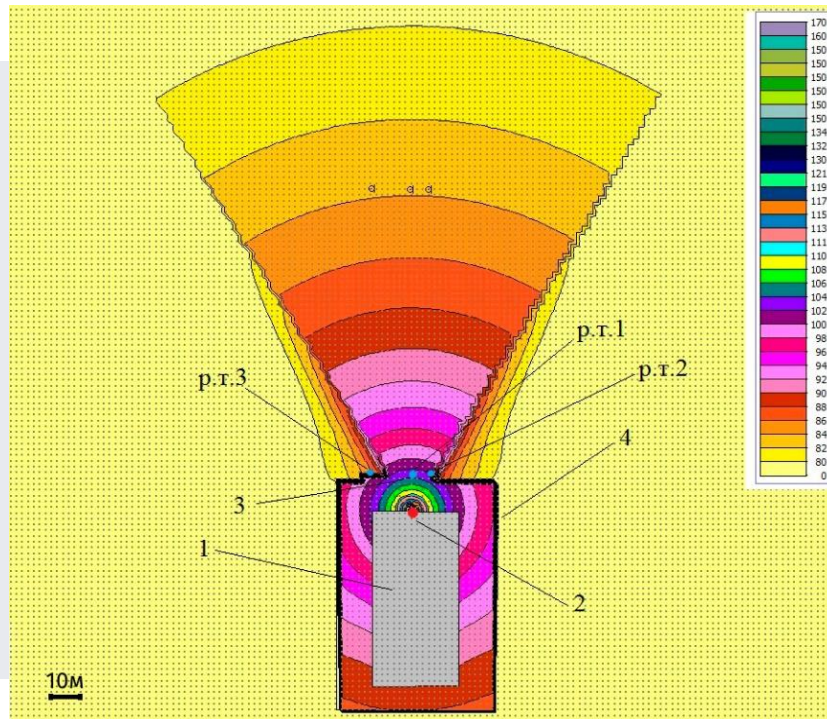
## Гранты

Диссертационные исследования поддержаны грантом в области фундаментальных исследований РФФИ «Аспиранты» № 19-3890093



# Изолинии уровней звука при наличии технологического проема в экране шириной 6 м

Изолинии уровней звука при наличии  
технологического проема в экране шириной 6 м



р.т.1 - напротив середины проема

р.т.2 - на расстоянии 3 м справа от центра проема

р.т.3 - на расстоянии 7 м от центра проема

# Минимальные удельные затраты на звукоизоляцию газопровода после ГРП



| Материал                 | $x$ , руб/м <sup>2</sup> | $d$ , м | $D$ , м | $L$ , м | $V$ , м <sup>3</sup> | $k_{уд}$ , руб/ м <sup>3</sup> | $r_{об}$ , руб/дБ |
|--------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| Thermaflex (ThermaSheeT) | 1605                     | 0,013   | 1,2     | 40      | 1,959                | 123488                         | 43163             |
|                          | 2928                     | 0,025   | 1,2     | 40      | 3,768                | 117122                         | 59776             |
|                          | 3757                     | 0,03    | 1,2     | 40      | 4,521                | 125233                         | 70188             |
| Armaflex (Armadust)      | 1690                     | 0,025   | 1,2     | 40      | 3,768                | 67633                          | 44236             |
|                          | 2085                     | 0,04    | 1,2     | 40      | 6,028                | 52137                          | 49194             |
| K-FONIK OPEN CELL        | 2320                     | 0,025   | 1,2     | 40      | 3,768                | 92815                          | 52144             |
|                          | 4768                     | 0,05    | 1,2     | 40      | 7,536                | 95374                          | 82895             |
| K-FONIK B                | 1883                     | 0,03    | 1,2     | 40      | 4,521                | 62794                          | 46661             |
|                          | 2126                     | 0,04    | 1,2     | 40      | 6,028                | 53152                          | 49703             |
| K-FONIK FIBER P          | 1424                     | 0,03    | 1,2     | 40      | 4,521                | 47484                          | 40892             |
|                          | 2627                     | 0,05    | 1,2     | 40      | 7,536                | 52558                          | 56006             |
| K-FONIK PU               | 3074                     | 0,05    | 1,2     | 40      | 7,536                | 61497                          | 61620             |
|                          | 3849                     | 0,07    | 1,2     | 40      | 10,554               | 54986                          | 71343             |
|                          | 5567                     | 0,1     | 1,2     | 40      | 15,072               | 55673                          | 92926             |
| K-FONIK ST GK            | 3364                     | 0,012   | 1,2     | 40      | 1,808                | 280345                         | 65253             |
|                          | 4117                     | 0,027   | 1,2     | 40      | 4,069                | 152482                         | 74709             |

$x$  – стоимость материала

$d$  – толщина материала

$D$  – диаметр трубопровода

$L$  – длина трубопровода

$V$  – объем звукоизоляционного материала

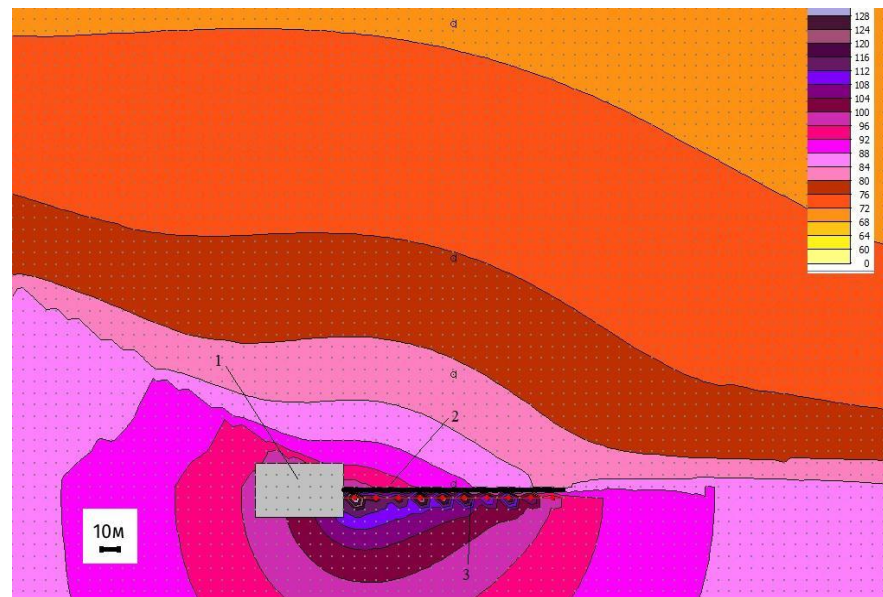
$k_{уд}$  – удельная стоимость звукоизоляционного покрытия толщиной  $d$

# Изолинии уровня звука с учетом изменения высоты прохождения газопровода при высоте экрана 6 м (А) и 5 м (Б)

А



Б



- Высота экрана: 5 м
- Длина газопровода: 100 м
- Экран расположен на расстоянии 3 м от оси газопровода

Акустическая эффективность экрана незначительна, если минимальное расстояние от газопровода до верхней кромки экрана менее 2,5 м