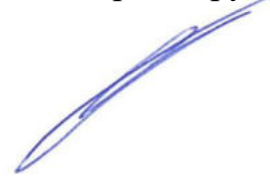


На правах рукописи



СВЕТЛОВ ВАЛЕРИЙ ВАЛЕРИЕВИЧ

**ОЦЕНКА И СНИЖЕНИЕ ШУМА СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В
ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ**

01.04.06 – Акустика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шашурин Александр Евгеньевич

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент

Шашурин Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Иголкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматические системы энергетических установок» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Пименов Игорь Константинович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Гидрофизические средства поиска» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

Защита состоится 08.04.2021 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д.212.010.01 в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Автореферат разослан « _____ » _____ февраля 2021 г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул. д. 1, e-mail: drozdova_lf@voenmeh.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета



Дроздова
Людмила Филипповна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Повышенный шум – один из основных физических факторов, обуславливающих загрязнение окружающей среды.

В Государственном докладе «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году» подготовленном Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека отмечается, что наиболее значимым из физических факторов, оказывающих влияние на среду обитания человека, является шум, воздействие которого на людей в условиях плотной застройки населенных пунктов продолжает возрастать. В данном докладе также указывается, что «Среди объектов – источников шума, являющихся основанием для жалоб, лидирующее значение, как и в предыдущие годы, занимают предприятия общественного питания и торговли, имеющие значительное количество вентиляционного оборудования, холодильного оборудования, наружные блоки системы кондиционирования и охлаждения, встроенные (пристроенные) к жилым домам, спортивно-оздоровительные учреждения, предприятия отдыха и развлечения...»

В литературе отмечается, что основным источником акустического загрязнения в городах является транспорт. Вместе с тем, вклад таких стационарных источников шума, как чиллеры, вентиляционные и дизель-генераторные установки (ДГУ), трансформаторные подстанции (ТП) и др., в суммарные уровни шумового поля в жилых кварталах нередко существенно превышает вклад транспорта.

Уровень звука от стационарных источников шума (ИШ), расположенных на территории предприятий, у ближайших жилых домов достигает 60-65 дБА и превышает допустимые санитарные нормы на 20-25 дБА, или в 4-6 раз по субъективному ощущению громкости.

Вопросами снижения шума в жилой застройке занимались известные отечественные ученые: В.А. Аистов, А.В. Васильев, Н.И. Иванов, Д.А. Ку克林, В.Ю. Кирпичников, Г.Л. Осипов, П.И. Поспелов, Н.В. Тюрина, И.Е. Цукерников,

И.Л. Шубин, А.Е. Шашурин, Ю.П. Щевьев. За рубежом над проблемой работали: Д. Арена, М. Крокер, Л. Беранек, Дж. Курце, З. Маекава, С. Редфери и др.

В литературе известны практические решения по снижению шума в источнике возникновения (например, вентиляционных систем, компрессорных установок). Средства снижения шума от стационарных источников на пути распространения рассмотрены в малом объеме, в большинстве работ не описан порядок их применения и выбора основных параметров, влияющих на акустическую эффективность. Вопрос расчета уровней шума от стационарных источников с учетом шумозащитных экранов (ШЭ) и шумозащитных кожухов недостаточно изучен.

Цель работы: научное обоснование технических решений, направленных на снижение акустического загрязнения от стационарных источников шума в жилой застройке.

Объект исследования: шум в жилой застройке от стационарных ИШ.

Предмет исследования: процессы физической картины распространения шума от стационарных ИШ в жилую застройку с учетом применения шумозащитных конструкций.

Задачи исследования:

- изучить особенности шумообразования стационарных ИШ, определить их характеристики и зону акустического дискомфорта, разработать их классификацию;
- разработать метод определения инженерно-технологического оборудования предприятия, вносящего основной вклад в уровень шума в жилой застройке;
- разработать расчетные схемы и изучить математические модели, выполнить теоретические исследования методов расчета шума в жилой застройке при применении технологических ШЭ и шумозащитных кожухов – основных средств защиты от шума на пути распространения звука до жилой застройки;
- разработать опытный стенд с целью выполнения экспериментальных исследований, включающих проверку корректности основных допущений теории расчета шума в жилой застройке с учетом наличия ограждений:

технологических ШЭ и шумозащитных кожухов, точности расчетов, связи эффективности ШЭ с их конструктивным исполнением и размещением в пространстве;

- разработать рекомендации по выбору средств защиты от шума на основании предложенной классификации;
- выполнить апробацию предложенных решений и рекомендаций.

Научная новизна:

- разработана классификация стационарных ИШ в зависимости от их акустических характеристик и зоны акустического дискомфорта с учетом применения средств защиты от шума;
- разработан метод определения основных источников шума предприятий, влияющих на повышенные уровни шума на территории жилой застройки, с использованием узкополосного анализа;
- разработаны расчетные схемы и математические модели для расчета шума от стационарных ИШ, распространяющегося в жилую застройку с учетом применения технологических шумозащитных экранов и шумозащитных кожухов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- изучены акустические характеристики и особенности образования шума стационарных источников, произведена их классификация;
- получены теоретические зависимости, подтвержденные экспериментально, описывающие распространение шума в жилую застройку при применении технологических ШЭ в зависимости от их конструктивных особенностей и расположения в пространстве;
- в отличие от существующих методик определена эффективность шумозащитного кожуха с учетом резонансных явлений в его стенках.
- разработаны рекомендации по снижению шума стационарных ИШ в источнике и на пути распространения на основании их классификации;
- выполнена апробация предложенных рекомендаций и полученных результатов исследования на практике.

Методология и методы исследования: теоретические исследования с использованием методов статистической теории акустики, измерение в натуральных условиях, моделирование на опытном стенде, октавный и узкополосный анализ спектров шума.

Научные положения, выносимые на защиту:

- классификация стационарных ИШ по фактору шума;
- метод определения основных источников шума предприятия на территории жилой застройки;
- расчетные схемы и математические модели, в том числе для четырех схем технологических ШЭ и одной схемы для шумозащитного кожуха;
- результаты теоретических исследований и данные экспериментальных измерений распространения шума от стационарных ИШ в жилую застройку с учетом применения шумозащитных кожухов, а также технологических ШЭ в зависимости от их конструктивного исполнения и расположения в пространстве;
- рекомендации по проектированию и выбору средств и методов защиты от шума стационарных ИШ на основании их классификации;
- апробация полученных результатов на практике и результаты внедрения.

Достоверность разработанных решений. Достоверность принятых допущений и теоретических моделей подтверждена серией экспериментов, выполненных в натуральных условиях. Корректность экспериментальных результатов подтверждается использованием прецизионной акустической аппаратуры, а также современных методик измерений и обработки информации.

Внедрение результатов работы:

Рекомендованные автором мероприятия внедрены на объектах:

- ПАО «Мегафон» Санкт-Петербург, 16-ая линия ВО д. 131.
- ООО УК «Содружество», Калининградская область, г. Светлый, ул. Гагарина, д. 65.
- «ООО «НАРТЕКС», г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 139, к. 1, строение 1.

Апробация работы:

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях или конгрессах: Пятый международный экологический конгресс «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT 2015. 16–20 сентября 2015г. гг. Самара, Тольятти; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 18–20 марта 2015 г. Санкт-Петербург; VI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 21–23 марта 2017 г. Санкт-Петербург; Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», 18 мая 2018 г. Москва; Четвертая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», 24 мая 2019 г. Москва.

Публикации:

По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 из списка журналов, рекомендованных ВАК, получено 3 патента.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 163 наименований, 1 приложения, изложена на 219 стр., содержит 68 таблиц и 98 рисунков.

Содержание работы:

Во введении показана актуальность работы, указаны цель и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ состояния проблемы повышенных уровней шума от стационарных источников в жилой застройке. Дано описание объектов исследования, в числе которых: вентиляционные и аспирационные системы, тягодутьевые машины, холодильные установки, системы кондиционирования воздуха, градирни, дизель-генераторные установки, компрессорное и трансформаторное оборудование.

Рассмотрено образование и снижение механического, аэродинамического и электромагнитного шума. Проанализированы методы и средства шумозащиты на пути распространения. К основным и наиболее эффективным средствам отнесены технологические шумозащитные экраны и шумозащитные кожухи.

Во второй главе приведены акустические характеристики и выполнена классификация стационарных источников шума, определено их воздействие на жилую застройку, определены зоны акустического дискомфорта от различных видов источников.

Установлено наличие акустического загрязнения от стационарных источников шума в жилой застройке, зафиксировано превышение уровня звука (УЗ) в пределах 7-22 дБА (в ночное время суток). Были проанализированы акустические характеристики более 200 стационарных источников шума, как полученных автором, так и взятых из паспортных данных оборудования. Корректированные уровни звуковой мощности (УЗМ) источников шума лежат в пределах: от 59 до 125 дБА и в большинстве случаев эти источники создают шум, превышающий нормативные значения для территории жилой застройки на расстояниях от 25 до 800 м.

Все источники шума предложено, в зависимости от полученных значений корректированных УЗМ, разбить на 10 категорий с шагом 5 дБА: категория 1 (до 70 дБА), категория 2 (от 70 до 75 дБА), категория 3 (от 75 до 80 дБА), категория 4 (от 80 до 85 дБА), категория 5 (от 85 до 90 дБА), категория 6 (от 90 до 95 дБА), категория 7 (от 95 до 100 дБА), категория 8 (от 100 до 105 дБА), категория 9 (от 105 до 110 дБА), категория 10 (свыше 110 дБА).

Исследованные стационарные источники шума распределены по группам и категориям шумности. Для всех исследованных источников шума, исходя из акустических характеристик, была получена зона акустического дискомфорта. Расчет производился для ночного времени суток для каждой выделенной категории источника. В зависимости от величины зоны акустического дискомфорта и акустической характеристики была разработана классификация источников шума по степени шумности.

I класс – малошумные, УЗМ до 70 дБА, зона акустического дискомфорта 25 м, II класс – повышенной шумности, УЗМ до 75 дБА, зона акустического дискомфорта 50 м, III класс – шумные, УЗМ от 75 до 80 дБА, зона акустического дискомфорта 100 м, IV класс – очень шумные, УЗМ от 80 до 85 дБА, зона акустического дискомфорта 200 м, V класс – сверхшумные, УЗМ от 85 до 90 дБА, зона акустического дискомфорта 400 м, VI класс – опасно шумные, УЗМ свыше 90 дБА, зона акустического дискомфорта 800 и более метров.

Меры снижения шума в источнике образования считаются наиболее рациональными, поэтому была исследована эффективность мероприятий по шумоглушению, которые можно отнести к наиболее реализуемым:

- снижение частоты вращения, например, вентиляционных установок;
- изменение направленности излучения;
- виброизоляция оборудования;
- установка глушителей шума в воздуховодах;

По результатам исследований отмечено, что меры по снижению шума в источнике довольно заметны, но недостаточны для снижения УЗД и УЗ в жилой застройке до требований санитарных норм. Необходимо рассмотреть меры по шумоглушению на пути распространения звука.

В третьей главе разработаны расчетные схемы и приведены результаты теоретических исследований технологических шумозащитных экранов.

Вывод формул для расчетов технологических экранов базируется на предложенном и обоснованном А.Е. Шашуриным допущении об образовании квазидиффузного (по признаку изотропности) звукового поля в полузамкнутом условном объеме, образованном фронтальным и боковыми экранами, опорной поверхностью и поверхностями источника шума (рисунок 1).

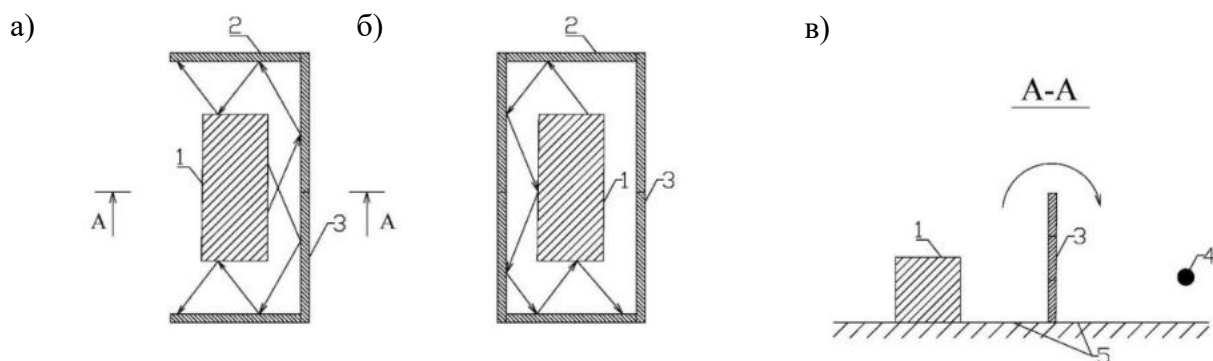


Рисунок 1 – Формируемые условные объемы технологических ШЭ (а) и (б) – вид сверху; (в) - разрез: 1 – ИШ, 2 – боковая часть ШЭ, 3 – фронтальная часть ШЭ, 4 – расчетная точка (РТ), 5 – отражающая опорная поверхность, \rightarrow – отраженный звук в объеме,

\curvearrowright – дифракция звука на свободном ребре ШЭ.

Для расчетов шума в жилой застройке с учетом применения технологических шумозащитных экранов предложены расчетные схемы:

- ИШ расположен на одной поверхности с РТ, находящейся напротив фронтальной части технологического ШЭ (таблица 1 схема №1);
- ИШ расположен на одной поверхности с РТ, находящейся напротив боковой части технологического ШЭ (таблица 1 схема №2);
- ИШ и ШЭ расположены на поверхности выше РТ, например, на кровле здания, а РТ находится ниже в условиях свободного звукового поля (таблица 1 схема №3);
- ИШ и ШЭ расположены выше РТ, вблизи ИШ имеется отражающая поверхность (например, стена соседнего здания), к которой примыкают боковые части ШЭ (таблица 1 схема №4).

Для расчетов шума в жилой застройке с учетом применения шумозащитного кожуха предложена расчетная схема, в которой кожух представлен, как конструкция, состоящая из металлического каркаса с закрепленным на нем металлическим листами, облицованными с внутренней стороны звукопоглощающим материалом. Акустическая энергия в окружающую среду распространяется через его стенки (таблица 1 схема №5).

Полученные формулы для расчета шума в жилой застройке приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные схемы и формулы

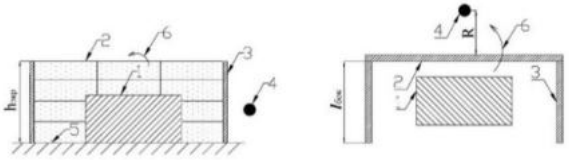
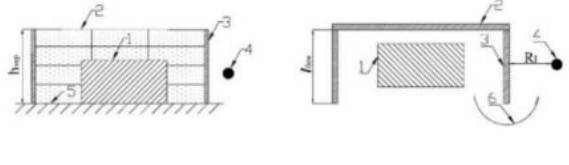
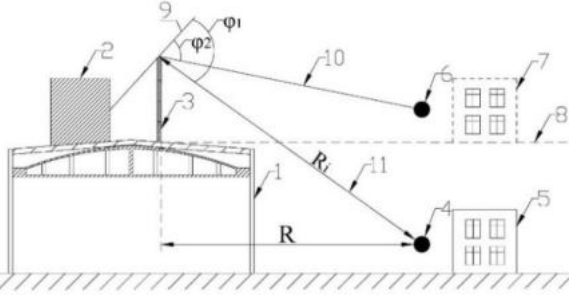
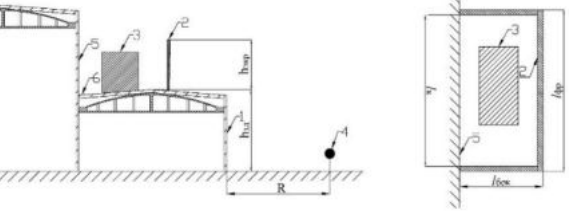
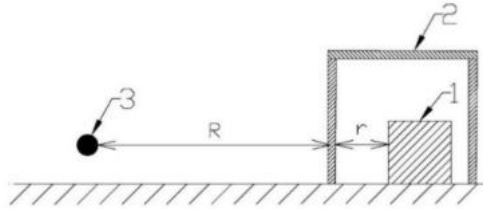
№ п/п	Расчетная схема	Обозначения на схеме	Формулы расчетов
1	<p style="text-align: center;">Схема №1</p> 	<p>1 – ИШ, 2 – фронтальная часть ШЭ, 3 – боковая часть ШЭ, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность между ИШ и ШЭ, 6 – дифракция звука</p>	$L_{РТ} = L_{\text{виш}} + 10\lg[1 - \bar{\alpha}_{об}] - 10\lg\left[\frac{h_{\text{экп}}}{\lambda}\right] - \text{ПД}^{\text{фр}} - 10\lg[\Psi_{об}] - 10\lg\left[\frac{A_{об}}{A_0}\right] - 10\lg\left[\frac{R}{R_0}\right] + K_1 + K_2 - 7, \text{ дБ}$
2	<p style="text-align: center;">Схема №2</p> 	<p>1 – ИШ, 2 – фронтальная часть ШЭ, 3 – боковая часть ШЭ, 4 – РТ, 5 – опорная поверхность между ИШ и ШЭ, 6 – дифракция звука</p>	$L_{РТ} = L_{\text{виш}} + 10\lg[1 - \bar{\alpha}_{об}] - 10\lg\left[\frac{l_{\text{бок}}}{\lambda}\right] - \text{ПД}^{\text{бок}} - 10\lg[\Psi_{об}] - 10\lg\left[\frac{A_{об}}{A_0}\right] - 10\lg\left[\frac{R_1}{R_0}\right] + K_3 + K_4 - 7, \text{ дБ}$
3	<p style="text-align: center;">Схема №3</p> 	<p>1 – здание, 2 – ИШ, 3 – ШЭ, 4 – РТ, 5 – защищаемый объект, 6 – условная РТ для объекта, расположенного на одной плоскости (8) с ШЭ, 7 – условное расположение защищаемого объекта, 9 – линия, соединяющая вершину ШЭ с ИШ, 10 – линия, соединяющая условную РТ (6) и вершину ШЭ, 11 – линия между вершиной ШЭ установленного на здании и РТ (4), φ_1 – угол между линией (9) и (11), φ_2 – угол между линией (9) и (10)</p>	$L_{РТ} = L_{\text{вист}} + 10\lg[1 - \bar{\alpha}_{об}] + 10\lg[1 - \bar{\alpha}_{\text{экп}}] - 10\lg\left[\frac{h_{\text{эф}}}{\lambda}\right] - \text{ПД}^{\text{фр}} - 10\lg[\Psi_{об}] - 10\lg\left[\frac{A_{об}}{A_0}\right] - 10\lg\left[\frac{R_i}{R_0}\right] + K_5 + K_6 - 7, \text{ дБ}$
4	<p style="text-align: center;">Схема №4</p> 	<p>1 – здание, 2 – ШЭ, 3 – ИШ, 4 – РТ, 5 – примыкающая конструкция, 6 – отражающая поверхность на кровле здания</p>	$L_{РТ} = L_{\text{виш}} + 10\lg[1 - \bar{\alpha}'_{об}] + 10\lg[1 - \bar{\alpha}_{\text{экп}}] - 10\lg\left[\frac{h_{\text{эф}}}{\lambda}\right] + \text{ПД}^{\text{фр}} - 10\lg[\Psi_{об}] - 10\lg\left[\frac{A_{об}}{A_0}\right] - 10\lg\left[\frac{R_i}{R_0}\right] + K_5 + K_6 - 7, \text{ дБ}$

Таблица 1. Расчетные схемы и формулы (продолжение)

5	<p style="text-align: center;">Схема №5</p> 	<p>1 – ИШ, 2 – шумозащитный кожух, 3 – РТ</p>	$L_{РТ} = L_{W_{ист}} - 20 \log(R) + 10 \log \left(\frac{\chi}{2\pi r^2} + \frac{4}{kB_{кож}} \right) - 3И + 10 \log(S) - 10 \log(2\pi) - \Delta L_{рез}$
---	---	---	--

Обозначения в рассматриваемых формулах для представленных расчетных схем: $\Delta L_{РТ}$ – эффективность в расчетной точке (дБ); $L_{W_{иш}}$ – уровень звуковой мощности источника шума (дБ); $\bar{\alpha}_{об}$ и $\bar{\alpha}'_{об}$ – средний коэффициент звукопоглощения в условном объеме, образованном опорной поверхностью, боковым и фронтальными экранами и свободными проемами условного объема; $h_{экр}^{эф}$ – эффективная высота экрана (м); λ – длина волны (м); ПД – показатель дифракции (дБ); $\Psi_{об}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в условном объеме; $A_{об}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения объема (m^2); $A_0 = 1 m^2$; R – расстояние от ШЭ до РТ (м); $R_0 = 1 m$; $K_1 = 10 \lg \left[\arctg \frac{l_{фр}}{2h_{экр}^{эф}} \right]$, $l_{фр}$ – длина фронтальной части ШЭ (м); $K_2 = 10 \lg \left[\arctg \frac{l_{фр}}{2R} \right]$, $K_3 = 10 \lg \left[\arctg \frac{h_{экр}}{2l_{бок}} \right]$, $l_{бок}$ – длина бокового отгона (м); $K_4 = 10 \lg \left[\arctg \frac{h_{экр}}{2R_1} \right]$, R_1 – расстояние от бокового отгона ШЭ до РТ (м); R_i – расстояние от верхней кромки ШЭ до РТ (м); $K_5 = 10 \lg \left[\arctg \frac{l_{фр}}{2h_{экр}^{эф}} \right]$, $K_6 = 10 \lg \left[\arctg \frac{l_{фр}}{2R_i} \right]$, χ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля; r – расстояние от источника шума до стенки кожуха (м); k – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в объеме кожуха; $B_{кож}$ – акустическая постоянная кожуха, (m^2); 3И – звукоизоляция стенок кожуха (дБ); S – площадь стенки кожуха, обращенной на РТ (m^2); $\Delta L_{рез} = 67 + 30 \log(h) - 20 \log(S) - 20 \log(\eta) - 10 \log(f_{qn})$, h – толщина стенки кожуха (м); η – коэффициент потерь; f_{qn} – резонансная частота изгибных колебаний стенки кожуха (Гц).

Для разработанных схем получены математические модели: уровни шума в РТ определяются формой ШЭ, его расположением в пространстве, акустическими свойствами условного объема, эффективной высотой, расположением расчетной точки, а также величиной дифракции звука на свободном ребре ШЭ. Для расчетной схемы №5 получена математическая модель, учитывающая влияние низших форм собственных колебаний конструкции стенок кожуха на ослабление его звукоизоляционной способности.

Выполнены теоретические исследования, которыми установлено:

- зависимость эффективности технологического ШЭ от эквивалентной площади звукопоглощения объема ($A_{об}$) имеет вид параболы; в практических пределах $A_{об}$ от 50 до 500 м² эффективность увеличивается суммарно на 10 дБА, при этом от 50 до 200 м² на 6 дБА, а от 300 до 500 м² на 3 дБА, что дает важные сведения для проектировщиков при выборе конструкций экранов;
- при увеличении среднего коэффициента звукопоглощения панелей экрана в практических пределах от 0,2 до 0,7 увеличение эффективности технологического ШЭ достигает 4 дБА;
- при расположении технологического ШЭ на кровле здания его эффективность возрастает на 8 дБА при увеличении высоты здания с 5 до 40 м;
- применение боковых экранов (отгонов) может увеличить эффективность на 3 дБА;
- теоретические вычисления значений $10lg[arctgX]$ показывают значение прибавки к суммарной эффективности ШЭ в пределах от -2 до +10 дБ (дБА);
- резонансные явления оказывают негативное влияние на звукоизолирующую способность конструкции кожуха и могут её ослаблять на величину до 16 дБ в низкочастотном диапазоне.

В четвёртой главе изложены: выбранный метод измерений акустических характеристик ИШ в условиях их работы на производстве, определены принципы

классификации стационарных ИШ, разработан метод определения основных источников шума предприятия на территории жилой застройки, определены методы измерений с целью оценки влияния основных параметров технологических шумозащитных экранов и шумозащитного кожуха. Измерения выполнялись как на действующих предприятиях, так и на опытном стенде.

Метод определения основных источников шума от работы предприятия на территории жилой застройки, основан на узкополосном анализе уровней звукового давления, измеренных на прилегающей нормируемой территории и у наиболее шумных источников предприятия, включает в себя следующий алгоритм:

1. Измерение октавных и 1/3 октавных уровней звукового давления и узкополосных спектров шума на территории жилой застройки с последующим их сравнением с допустимыми значениями, определение требуемого снижения.
2. Инвентаризация предполагаемых основных источников шума предприятия с проведением измерений 1/3 октавных уровней звукового давления и узкополосных УЗД источников.
3. Выявление источника(ов) с частотами дискретных составляющих такими же, как у дискрет в спектре звукового давления в зоне жилой застройки.

Для возможности вариативного проведения измерений как акустических параметров, так и эффективности технологических шумозащитных экранов был выбран полигон, на котором сооружался опытный стенд, позволяющий реализовывать различные экспериментальные схемы исполнения технологических шумозащитных экранов.

Стенд был выполнен в натуральную величину с возможностью изменять высоту от 1 до 4 м в виде прямой и П-образной (в плане) конструкции. Звуковое поле создавалось искусственным источником звука. В качестве шумозащитных панелей дополнительно использовались строительные шумозащитные панели и панели-резонаторы.

Точки измерений изменялись как по расстоянию, так и по высоте (рисунок 2) и располагались как напротив фронтальной, так и боковой части технологического ШЭ.

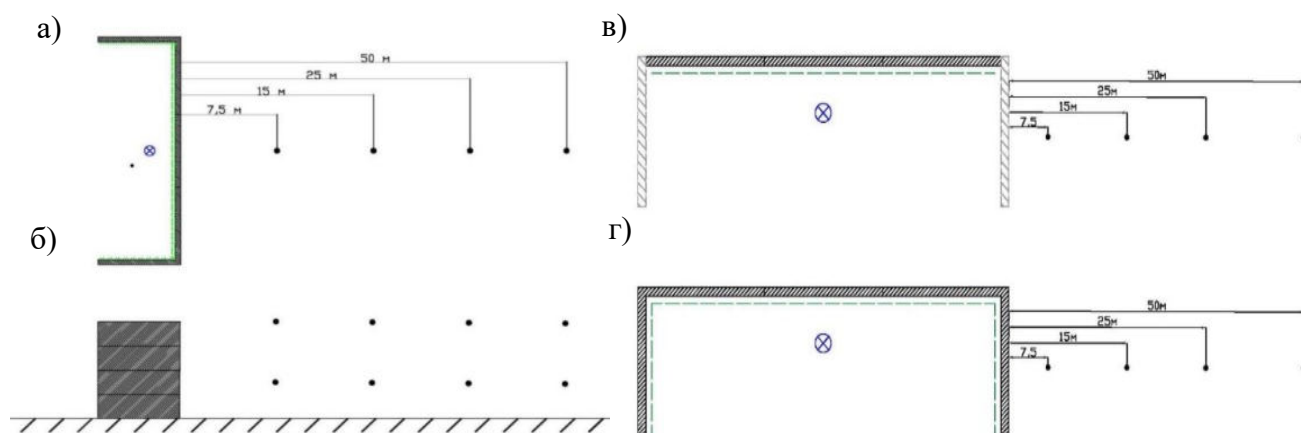


Рисунок 2 – Схема измерений для фронтальной части (слева) и боковых частей ШЭ (справа):

а – вид в плане, б – вид сбоку, в – без боковой части ШЭ, г – с боковой частью ШЭ.

На опытном полигоне в условиях свободного звукового поля проводились исследования эффективности применения шумозащитного кожуха. Точки измерений выбирались на расстоянии больше двух максимальных размеров стороны кожуха.

Схема расположения точек измерений представлена на рисунке 3.

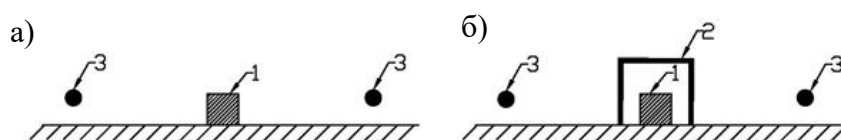


Рисунок 3 – Схема измерений акустической эффективности кожуха: а – свободное звуковое поле, б – шумозащитный кожух установлен искусственный источник шума; 2) шумозащитный кожух; 3) точка измерений

В пятой главе приведены результаты измерений с целью выявления основных ИШ предприятия и результаты исследований технологических экранов на опытном стенде.

На примере действующего предприятия с числом источников шума более 120 единиц выполнена проверка алгоритмов разработанного метода поиска основных источников шума. Показано, что при проведении натурных измерений применение

узкополосного анализа уровней звукового давления позволяет выявить источники, оказывающие наибольшее акустическое воздействие на жилую застройку.

Была выполнена проверка точности расчетов по предложенным формулам (рисунок 4). Отклонение расчетных результатов от данных эксперимента в основном составляет не более ± 2 дБ, что позволяет получить более точный расчет, а также снизить погрешность при построении карт шума территории.

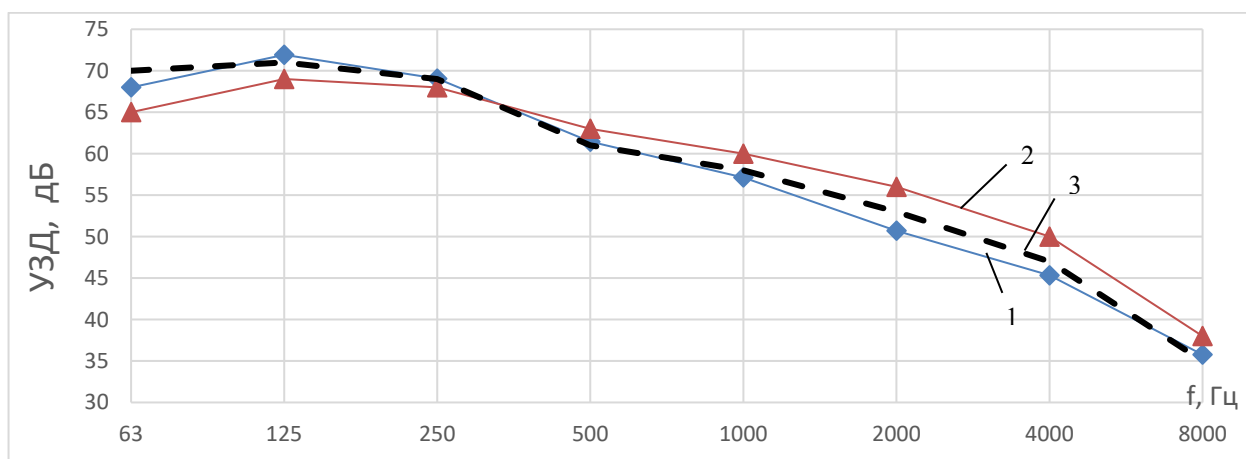


Рисунок 4 – Сравнение данных расчета по предложенной формуле (1), действующей нормативной документации (2) и результатам эксперимента (3).

Было показано, что расчет по предложенной формуле с учетом снижения эффективности шумозащитного кожуха за счет ослабления звукоизоляционной способности его стенок показывает сходимость результатов с точностью ± 1 дБ в низкочастотной области и до ± 3 дБ в средне и высокочастотной области спектра (рисунок 5).

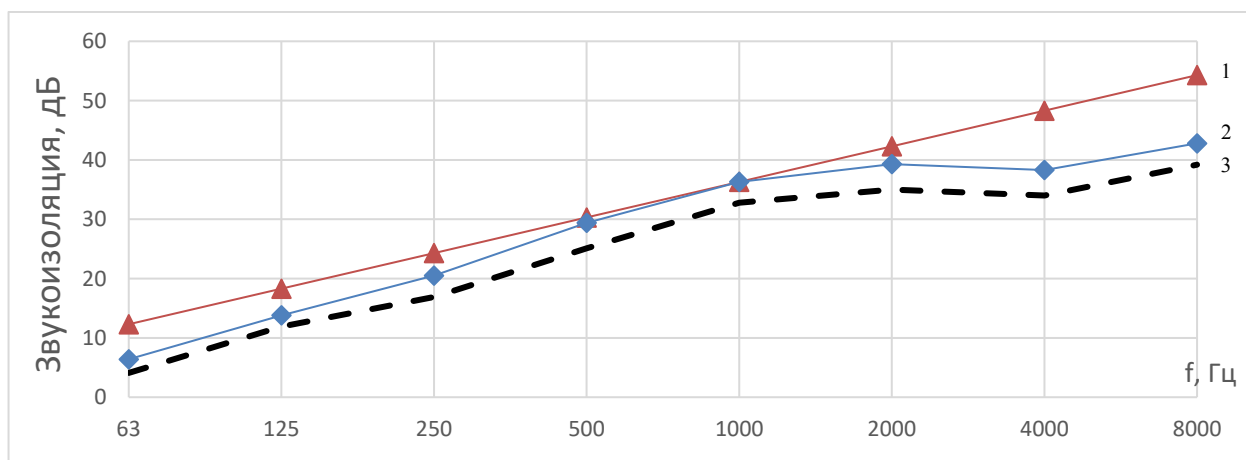


Рисунок 5 – Сравнение данных расчета по закону массы (1), предложенной формуле (2) и по результатам эксперимента (3)

Положение точки (ТИ) измерения заметно влияет на эффективность технологических экранов. При увеличении расстояния с 7,5 до 25 м эффективность экрана уменьшается на 1-8 дБ во всем нормируемом диапазоне частот и соответственно на 3 дБА. (высота точки измерений 1,5 м). При увеличении высоты точки измерений до 4,0 м эффективность экрана дополнительно уменьшается на 4 дБ (расстояния 15, 25 и 50 м). Снижение эффективности экрана без боковых отгонов (таблица 2) составляет 1-5 дБ (3 дБА).

Таблица 2. Акустическая эффективность П-образного и фронтального ШЭ высотой $h_{\text{экp}} = 4,0$ м на расстоянии 25 м

Тип ШЭ	Высота ТИ, м	Акустическая эффективность, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								УЗ, дБА
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
П-образный	1,5	7	8	11	15	19	22	25	32	18
	4,0	7	8	10	13	16	20	23	30	16
Без боковых частей	1,5	6	6	9	10	15	18	20	27	15
	4,0	6	6	8	10	12	15	17	24	13

Если защищаемый объект расположен напротив боковой части ШЭ эффективность составляет: 1–5 дБ для средне и низкочастотного диапазонов и от 9 до 20 дБ для высокочастотного при высоте точки измерений 1,5 м (рисунок 6).

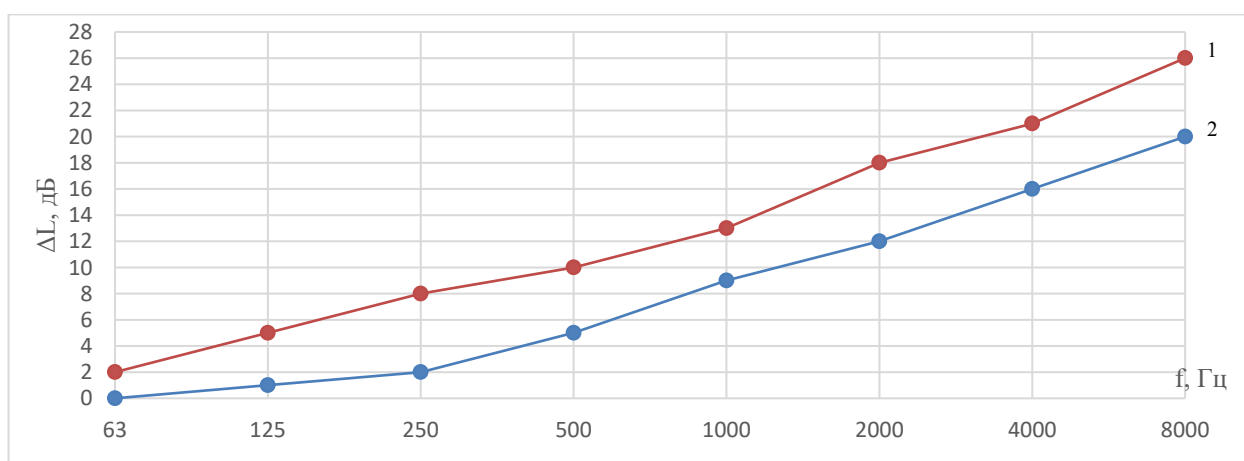


Рисунок 6 – Сравнительная акустическая эффективность (ΔL) фронтального (1) и бокового (2) ШЭ (измеренные на расстоянии 25 м) $h_{\text{ТИ}} = 1,5$ м

В шестой главе приведены рекомендации по выбору шумозащиты и представлены результаты апробации и внедрения результатов работы.

Рассмотренные мероприятия по шумозащите в зависимости от класса шумности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Классификация и рекомендации по применению шумозащитных мероприятий для стационарных источников шума

Класс шумности	Наименование класса	УЗМ, дБА	Источники	Шумозащитные мероприятия
I	Малозумные	до 70	Вентиляция Категории 1; ТП Категории 1; Компрессорное оборудование Категории 1	Не требуются
II	Шумные	от 70 до 75	Вентиляция Категории 2; ТП Категории 2; Системы кондиционирования Категории 2; Компрессорное оборудование Категории 2.	Изменение направленности; виброизоляция и вибродемпфирование оборудования; установка глушителей шума; установка технологических шумозащитных экранов (только фронтальная часть)
III	Повышенной шумности	от 75 до 80	Вентиляция Категории 3; Системы кондиционирования Категории 3; ТП Категории 3; Компрессорное оборудование Категории 3	Изменение направленности + виброизоляция или вибродемпфирование; установка глушителей шума; изменение частоты вращения; установка технологических шумозащитных экранов (минимум с одним боковым отгоном)
IV	Очень шумные	от 80 до 85	Вентиляция Категории 4; Аспирационные системы Категории 4; Тягодутьевые машины Категории 4; Системы кондиционирования Категории 4; Холодильные системы; Производственные градирни Категории 4; Компрессорное оборудование Категории 4; ТП Категории 4.	Изменение направленности + установка глушителей шума; изменение направленности + изменение частоты вращения; установка технологических шумозащитных экранов (с боковыми отгонами); изменение направленности + технологические шумозащитные экраны (с боковыми отгонами); шумозащитное остекление виброизоляция или вибродемпфирование + шумозащитное остекление
V	Сверхшумные	от 85 до 90	Вентиляция Категории 5; Аспирационные системы Категории 5; Тягодутьевые машины Категории 5; Системы кондиционирования Категории 5; Холодильные системы Производственные градирни Категории 5; Компрессорное оборудование Категории 5; ДГУ Категории 5; ТП Категории 5.	Установка глушителей шума + установка технологических шумозащитных экранов (с боковыми отгонами); установка глушителей шума + шумозащитное остекление; изменение частоты вращения + шумозащитное остекление
VI	Непереносимо шумные	свыше 90	Вентиляция Категории 6-10; Аспирационные системы Категории 6-10; Тягодутьевые машины Категории 6-10; Холодильные системы Категории 6; Производственные градирни Категории 6-10; Компрессорное оборудование Категории 6. Категории 6; ДГУ Категории 6-7.	возможность рассмотрения замены оборудования на малозумный аналог; совокупность вышеперечисленных мероприятий

Апробация результатов была выполнена более чем на 9 объектах, в качестве примера показаны результаты измерений на трех из них (таблица 4).

Таблица 4. Измеренные значений уровней звукового давления и уровней звука, а также допустимые уровни в жилой застройке

Описание	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровень звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ООО УК «Содружество» Калининградская область, г. Светлый, ул. Гагарина, д. 65									
До установки шумозащиты	63	57	47	43	44	34	22	18	48
После установки шумозащиты	58	46	39	38	35	28	18	15	40
Допустимый уровень	62	52	44	39	35	32	30	28	40
Филиал ООО «Нестле Россия» в г. Жуковский Московской области, ул. Мичурина, д. 17									
До установки шумозащиты	59	51	48	49	45	41	31	23	49
После установки шумозащиты	49	48	43	37	32	30	22	16	37
Допустимый уровень	62	52	44	39	35	32	30	28	40

На всех объектах шум снижен до нормативных значений. В показанных примерах в первом случае снижение шума составило 19 дБА, во втором и третьем 8 и 12 дБА соответственно.

Основные результаты работы были учтены при разработке нового нормативного документа: СП 254.1325800.2016 «Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума».

Основные выводы и результаты:

1. Инженерно-технологическое оборудование различного назначения может заметно влиять на акустическое загрязнение окружающей среды и создавать повышенные уровни на территории прилегающей жилой застройки.

2. Были получены акустические характеристики основных стационарных ИШ: вентиляции, аспирационных систем, тягодутьевых машин, систем кондиционирования, холодильных систем, трансформаторов, дизель-генераторных установок. Корректированные уровни звуковой мощности лежат в широких пределах от 59 до 125 дБА и в большинстве случаев эти ИШ при расположении вблизи жилой застройки излучают шум, превышающий допустимые значения на расстояниях от 25 до 800 м.

3. Для всех ИШ была определена зона акустического дискомфорта; разработана классификация исследованных стационарных ИШ в зависимости от класса шумности и зоны акустического дискомфорта.

4. Разработан и апробирован метод поиска основных ИШ предприятия, оказывающих наибольший вклад в процессы шумообразования на территории жилой застройки.

5. Разработано 5 расчетных схем для расчета шума в жилой застройке с учетом применения технологических ШЭ и шумозащитных кожухов. Для схем №1-4 принято допущение об образовании условного объема в пространстве между фронтальной и боковыми частями технологического экрана, а также опорной поверхностью.

6. Для разработанных схем №1-4 получены математические модели: шум в расчетной точке определяется формой ШЭ и его расположением в пространстве, акустическими свойствами условного объема, эффективной высотой, расположением расчетной точки, а также величиной дифракции звука на свободном ребре ограждения. Для разработанной схемы №5 получена математическая модель, в которой учтено влияние резонансных явлений в стенках шумозащитного кожуха на ослабление звукоизоляционной способности его стенок.

7. Создан опытный стенд для испытаний шумозащитного кожуха и технологических ШЭ и в натуральную величину, на котором проведены исследования по проверке предложенных методов расчета, а также выявления закономерностей взаимосвязи их акустической эффективности с конструктивным исполнением и расположением в пространстве.

8. Выполненное сравнение результатов расчета акустической эффективности П-образного ШЭ с данными эксперимента показало удовлетворительное совпадение полученных результатов: максимальное отклонение УЗД не выше ± 2 дБ. Выполненное сравнение результатов расчета акустической эффективности кожуха с учетом влияния на низших собственных частотах колебаний стенок шумозащитного кожуха показало сходимость ± 1 дБ в

области низкочастотной области (до 125 Гц включительно) и ± 3 дБ для средне и высокочастотной области.

9. Экспериментальными исследованиями на опытном стенде получены результаты: подтверждено заметное влияние звукопоглощения, так для ШЭ высотой 2 м. звукопоглощение обеспечивает дополнительный эффект 2-3 дБ в диапазоне частот 250 – 8000 Гц (2 дБА), при этом дополнительное влияние звукопоглощения растет с ростом высоты ШЭ; боковые отгоны играют существенную роль в конструкции П-образных технологических экранов: при их отсутствии акустическая эффективность ШЭ снижается: УЗД на 2-5 дБ, УЗ на 3 дБА; в то же время, если точка измерений расположена напротив бокового экрана (отгона) снижение УЗ достигает не менее 7-8 дБА.

10. На основании предложенной классификации стационарных ИШ даны рекомендации по применению шумозащитных мероприятий.

11. Результаты диссертации внедрены как в проектной документации в разделе «Защита от шума», так и при сооружении ШЭ, в том числе, по рекомендациям автора были установлены технологические ШЭ и шумозащитные кожухи для технологического оборудования свыше, чем на 9 объектах, на которых снижен шум до нормируемых значений; новизна и оригинальность предложенных решений подтверждена 3-мя патентами.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Светлов, В.В. Отличительные особенности технологических шумозащитных экранов / В.В. Светлов // В сборнике: Сборник трудов Пятого международного экологического конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕLPIT 2015». – 2015. – С. 161-162.

2. Шашурин, А.Е. Определение звукоизоляции и звукопоглощения шумозащитного экрана в натуральных условиях / А.Е. Шашурин, Ю.С. Бойко, В.В. Светлов // В сборнике: Сборник трудов Пятого международного экологического конгресса

«Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2015». – 2015. – С. 218-221.

3. Шашурин, А.Е. Образование звукового поля вблизи шумозащитного экрана на примере испытаний в натуральных условиях / А.Е. Шашурин, Ю.С. Бойко, В.В. Светлов // В сборнике: Сборник трудов Пятого международного экологического конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2015». – 2015. – С. 213-217.

4. Светлов, В.В. Обзор акустических характеристик технологического оборудования, требования к снижению шума / В.В. Светлов, Т.Н. Патрушева // В сборнике: Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», Санкт-Петербург, 21-23 марта 2017. – 2017. – С. 296-299.

5. Светлов, В.В. Снижение шума на рабочих местах технологическими шумозащитными экранами / В.В. Светлов, А.К. Андрющенко // В сборнике: Сборник трудов Второй всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», Москва, 19 мая 2017. – 2017. – С. 296-299.

6. Светлов, В.В. Исследование акустических экранов для снижения шума стационарных источников / В.В. Светлов // В сборнике: Сборник трудов Международного инновационного форума молодых ученых в рамках VI международного экологического конгресса (VIII международной научно-технической конференции) "Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2017, Самара - Тольятти, Россия, 20-24 сентября 2017 г. – 2017. – С. 204-219.

7. Светлов, В.В. Расчет эффективности технологического шумозащитного экрана для снижения шума от воздухозаборных решеток компрессорных установок / В.В. Светлов // Noise theory and practice. – 2017. Vol.3. – No.4. – С. 60-68.

8. Светлов, В.В. Связь эффективности шумозащитных экранов с их конструктивными особенностями / В.В. Светлов, А.К. Андрющенко // В сборнике: Сборник трудов Третьей всероссийской конференции молодых ученых и

специалистов «Акустика среды обитания», Москва, 18 мая 2018. – 2018. – С. 198-206.

9. Svetlov, V.V. Determination of the main source of external noise caused by the enterprise engineering and technological equipment in the residential development area / V.V. Svetlov, V.A. Sannikov. // Akustika. – 2019. – Vol. 32. – P. 50-53.

*10. Светлов, В.В. Снижение уровней шума в жилой застройке от инженерно-технологического оборудования предприятий / В.В. Светлов // Noise theory and practice. – 2020. – Vol.6. – No.4. – С. 115-127.

*11. Светлов, В.В. Учет погрешностей при построении карт шума / В.В. Светлов, М.В. Буторина, А.В. Осетров, К.П. Фиев // Noise theory and practice. – 2020. – Vol.6. – No.4. – С. 81-89.

*12. В.В. Светлов. Снижение шума стационарных источников в жилой застройке технологическими шумозащитными экранами / В.В. Светлов, Н.И. Иванов, А.Е. Шашурин // Безопасность жизнедеятельности: научно-практический и учебно-методический журнал – М.: Изд-во «Новые технологии». – 2018. – №6. – С. 16-22.

13. Пат. 171794 РФ, МПК E04B 1/84 (2006.01) E04B 1/86 (2006.01) E04B 2/02 (2006/01) E04B 2/02 (2006/01) E04C 2/34 (2006/01). Звукопоглощающая панель для шумозащитной конструкции / А.Е. Шашурин, В.В. Светлов, К.В. Бужинский, И.Н. Заплетников, В.А. Кириченко, Н.И. Иванов, Ю.С. Бойко ; патентообладатель ООО «Институт акустических конструкций». – № 2016141361 ; заявл. 20.10.16 ; опубл. 16.06.2017. - Бюл. №17. – 7 с. : ил.

14. Пат. 172673 РФ, МПК E01F 8/00 (2006.01). Панель резонатор / А.Е. Шашурин, В.В. Светлов, К.В. Бужинский, Ю.С. Бойко, В.И. Ким, С.Ю. Гришина ; патентообладатель ООО «Институт акустических конструкций». – № 2016113103 ; заявл. 05.04.16 ; опубл. 19.07.2017. - Бюл. №20. – 8 с. : ил.

15. Пат. 168981 РФ, МПК E01F 8/00 (2006.01). Дифрагирующая панель для шумозащитного экрана / А.Е. Шашурин, В.В. Светлов, К.В. Бужинский, Ю.С. Бойко, В.И. Ким ; патентообладатель ООО «Институт акустических конструкций». - № 2016113102 ; заявл. 05.04.16 ; опубл. 01.03.2017. - Бюл. №7. – 9 с. : ил.

* По списку ВАК

Издательство Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова. 190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии БГТУ.
190005, г. Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.