

## **ПУБЛИКАЦИИ ИНСТИТУТА СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

**НАУЧНЫЕ ТРУДЫ** - серия изданий научно-исследовательского Института строительной техники, которая включает в себя монографии, трактаты и исследования, демонстрирующие авторские научные достижения в следующих областях:

- безопасность конструкций,
- пожарная безопасность
- безопасность и удобство использования,
- защита от шума и вибраций и воздействие вибрации на человека и конструкции,
- рационализация использования энергии и воды,
- долговечность, включая защиту от влаги и коррозии химического и биологического происхождения,
- грунтовые основания под строительство,
- окружающая среда, в том числе влияние материалов на здоровье и санитарно-гигиенические условия в помещениях,
- взаимодействие условий окружающей среды,
- использование объектов строительства,
- устойчивое строительство,
- использование санитарно-гигиенического, промышленного и противопожарного оборудования, в том числе оборудования для обнаружения пожара, оповещения и пожарной сигнализации,
- безопасность электрических установок,
- использование элементов оборудования строительных объектов (в том числе элементов для обеспечения безопасности объектов от кражи со взломом, в том числе дверной арматуры, а также для эвакуации людей).

---

**ИНСТРУКЦИИ, РЕКОМЕНДАЦИИ, ПОСОБИЯ** - издательская серия Института строительной техники

---

**ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ И ПРИЕМКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ** - издательская серия Института строительной техники

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОГЛАСНО ЕВРОКОДАМ** - издательская серия Института строительной техники

---

## **ПРОГРАММНЫЙ ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ ИСТ**

Председатель	д-р инж. Ядвига Фанграт
Заместитель председателя	д-р инж. Михал Войтович
Секретарь	инж. Марек Гембажевский
Члены совета	проф. д-р хаб. инж. Лех Чарнецкий
	проф. д-р хаб. инж. Станислав Маньковский
	проф. д-р хаб. инж. Леонард Рункевич
	мгр. инж. Ян Сечковский
	д-р хаб. инж. Барбара Шудрович
	мгр. инж. Ядвига Творек

Войцех Венгжиньский, Гжегож Краевский

**Системы противопожарной вентиляции  
гаражей  
Проектирование, оценка, приемка**

Пособие



Институт строительной техники

## **РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ**

Главный редактор  
Заместитель главного редактора  
Секретарь  
Члены редколлегии

проф. д-р хаб. инж. Леонард Рункевич  
д-р инж. Ядвига Фанграт  
мгр. Данута Щепаньска  
д-р инж. Барбара Францке  
д-р инж. Роман Гайовник  
д-р инж. Тадеуш Ярош  
мгр. инж. Марек Капронь  
мгр. инж. Ян Сечковский

рецензенты

проф. д-р хаб. инж. Марек Конецкий  
бриг. мгр. инж. Ириной Копчиньский

Ответственные редакторы

д-р инж. Роман Гайовник, мгр. Ян Сечковский

Редактирование

Данута Щепаньска

Набор текста

Славомир Косярский

Дизайн обложки

Эва Коссаковска

Публикация из серии «Инструкции, Рекомендации, Пособия» 493/2015

Фотографии, помещенные в работе, взяты из архивов авторов, рисунки № 13, 15-17 разработаны авторами с использованием программы ANSYS Fluent

© Права Институт строительной техники

Варшава 2015

ISBN 978-83-249-6792-6

Авторы и издатель приложили все усилия к тому, чтобы публикуемая информация была взята из надежных источников. Издатель не несет ответственности и не берет на себя никаких обязательств за последствия использования потребителями содержания данной публикации. В частности, он не несет ответственности в отношении читателей и/или третьей стороны за любой ущерб, расходы и убытки, прямые и косвенные, включительно с потерей прибыли и других финансовых выгод, которые могут произойти или быть прямо либо косвенно связанными с содержанием опубликованного материала, в том числе за возможные ошибки или упущения, содержащиеся в опубликованных материалах.



Институт строительной техники

Отдел популяризации знаний

02-656 Варшава, ул. Ксаверов 21, тел.: 22 843 35 19

факс 22 56 64 282, электронная почта: wydawnictwa @ itb.pl, www.itb.pl

## Оглавление

<i>Резюме</i>	5
<i>Summary</i>	6
1. Предисловие	7
1.1. Введение	7
1.2. Предмет и область исследования	8
1.3. Термины и определения	10
2. Системы противопожарной вентиляции гаражей	12
2.1. Общая информация	12
2.2. Источники технических знаний в области противопожарной вентиляции гаражей	19
3. Общие требования к системам противопожарной вентиляции	20
3.1. Выбор системы	20
3.2. Приток компенсационного воздуха	21
3.3. Упрощенный сценарий работы системы	23
3.4. Классы эффективности работы элементов системы	26
3.5. Эвакуация лиц и критерии оценки системы	27
4. Канальная система противодымной вентиляции	29
4.1. Определение требуемой производительности системы	29
4.2. Разделение гаража на дымовые зоны	31
4.3. Размещение вытяжных решеток	32
5. Система струйной вентиляции, действующая как система очистки от дыма	35
6. Система струйной вентиляции, действующая как система контроля распространения дыма и тепла	38
6.1. Определение размеров системы	38
6.2. Разделение гаража на дымовые зоны и размещение оборудования	41
6.3. Сценарий действия системы	42
7. CFD анализ распространения дыма и тепла в гаражах	45
7.1. Метод CFD	45
7.2. Этапы CFD анализа	46
7.3. Объем анализа и выбор сценариев	48
7.4. Требования, предъявляемые к используемым вычислительным средствам	50
7.5. Отчет о проведенном CFD анализе и представление результатов расчетов	54

8. Пуск и приемка систем противопожарной вентиляции	58
8.1. Правовые основания приемки здания	58
8.2. Общие правила проведения испытаний с горячим дымом	59
8.3. Элементы, оцениваемые в ходе испытания	63
8.4. Критерии оценки	64
8.5. Документация по испытаниям с горячим дымом	64
8.6. Безопасность во время проведения испытаний с горячим дымом	64
9. Библиография	65

# Системы противопожарной вентиляции гаражей

## Проектирование, оценка, приемка

### *Резюме*

Системы противопожарной вентиляции гаражей являются важной частью всей совокупности систем, обеспечивающих безопасность пользователей объекта во время пожара. В исследовании представлены ключевые основы проектирования таких систем, их оценки и принятия в эксплуатацию. Рекомендации адресованы, в первую очередь, проектировщикам и исполнителям систем противопожарной вентиляции, но могут также быть полезны инвесторам, другим участникам процесса создания системы или должностным лицам, ответственным за их приемку. Основной темой работы является закрытые гаражи, предназначенные для парковки легковых автомобилей, за исключением объектов с устройствами, используемыми для хранения (складирования) транспортных средств. В пособии даны минимальные значения архитектурных параметров, при которых проектирование эффективной системы противопожарной вентиляции не вызывает каких-либо трудностей (по высоте и площади). В отношении объектов, не отвечающих этим требованиям, представлены рекомендации, которые позволяют повысить эффективность систем, и комплексная методика оценки принятых решений.

В предисловии к пособию дано краткое введение в проектирование, в котором приведены формально-правовые основы использования систем противопожарной вентиляции, сферы применения документа и используемая в нем терминология. В следующей главе рассматривается классификация автоматических противодымных установок, используемых в гаражах, на системы канальной противодымной вентиляции и системы струйной вентиляции, которые, в свою очередь, делятся на системы очистки от дыма и системы контроля распространения дыма и тепла. Подробно представлены принципы, по которым работают отдельные решения, и их предназначение. В следующих четырех главах пособия обсуждаются принципы проектирования систем противопожарной вентиляции гаражей. Представлены общие требования, важные для каждого типа систем противопожарной вентиляции, например, те, которые касаются способа подачи компенсационного воздуха, выбора класса элементов, входящих в систему, критериев оценки эффективности систем и связанных с проектом расчетов эвакуации людей. В главах, посвященных каждой из систем, представлены конкретные требования, в том числе минимальные значения производительности системы, способы размещения элементов системы или типичные сценарии работы отдельных систем.

После части, касающейся проектирования, представлены принципы проведения CFD (*Computational Fluid Dynamics*) анализов распространения дыма и тепла в гаражах. Такие анализы служат для оценки систем противопожарной вентиляции гаражей, но их достоверность во многом зависит от принятых допущений и граничных условий. Кроме рассчитываемых значений различных ключевых параметров, в работе также представлены рекомендации по оценке результатов анализа.

В самом конце содержатся рекомендации по проведению эксплуатационных испытаний с использованием метода горячего дыма. В отличие от других имеющихся в литературе рекомендаций, в данной работе делается акцент в первую очередь на качественной оценке системы в отрыве от количественных измерений. Во время испытаний с горячим дымом проверке подлежит действие не только системы противопожарной вентиляции, но и всех других связанных с ней систем пожарной безопасности на объекте.

# 1. ПРЕДИСЛОВИЕ

## 1.1. Введение

Системы, предназначенные для удаления дыма и дающие возможность контролировать его распространение, имеют важнейшее значение для обеспечения безопасности лиц, находящихся в здании, во время пожара. В случае закрытых гаражей риски возникшего в них пожара весьма высоки, как из-за вероятности загорания транспортных средств, так и убытков, которые могут возникнуть вследствие такого пожара.

Использование автоматических установок дымоудаления (систем противопожарной вентиляции) обусловлено требованиями, изложенными в распоряжении министра инфраструктуры, которые касаются технических условий, предъявляемых к зданиям и их расположению [1], в гаражах площадью свыше 1500 м<sup>2</sup>. Предельное значение площади относится также к суммарной площади группы гаражей в одном здании с общими путями коммуникации, функциональными связями или даже общим оборудованием и проводкой. Такие жесткие требования призваны предотвратить ситуацию, в которой инвесторы стали бы делить гаражи, составляющие один «организм», на пожарные отсеки площадью менее 1500 м<sup>2</sup> только с целью избежать необходимости установки дорогостоящей противопожарной вентиляции.

Кроме выполнения требований, содержащихся в положениях о противопожарной вентиляции, использование системы противопожарной вентиляции также может повлиять на другие требования строительных норм и правил, применяющихся к объекту [1], например, понижение требуемого класса огнестойкости здания (§215 - §216 [1]) или увеличение допустимой площади пожарного отсека (§227 - §230 [1]). При отступлении от требований строительных норм и правил системы противопожарной вентиляции часто представляются в качестве запасного решения, повышающего уровень пожарной безопасности на объекте.

Требования к системам противопожарной вентиляции, в том числе системам противопожарной вентиляции закрытых гаражей, сформулированные в § 270 распоряжения [1] являются функциональными [24]. Это означает, что законодатель не определяет точных формальных требований, связанных с параметрами используемой системы, а указывает цель ее использования. Поэтому проектировщик отвечает за разработку системы, которая позволит выполнить эти требования, вместе с представлением достоверных доказательств, подтверждающих эффективность системы. Следует подчеркнуть, что требования к системе относятся не только к безопасности людей, которые могут находиться в гаражах, но и к безопасности пожарно-спасательных команд. Доказательством соблюдения вышеуказанных требований могут быть аналитические расчеты на основе надежной методологии, представленной в нормативном документе, или результаты использования современных технических средств пожарной безопасности, рассматриваемых в данной публикации.

При проектировании системы противопожарной вентиляции следует иметь в виду возможность возникновения ситуации, когда, несмотря на правильно выбранные рабочие параметры - из-за специфических архитектурных условий - она может оказаться неэффективной. В качестве примера можно привести большой гараж с многочисленными узловыми точками коммуникаций, размещенными в его центральной части. Также произвольная замена ранее разработанной системы на другую (например, замена канальной противодымной вентиляции на систему струйной вентиляции, действующей как очистка от дыма) без существенного перепроектирования основных вентиляционных каналов или других ключевых элементов системы не представляется возможной.

Поэтому на этапе проектирования системы противопожарной вентиляции или при внесении серьезных изменений в проект целесообразно проводить численное моделирование с использованием метода вычислительной гидродинамики (англ. *Computational Fluid Dynamics, CFD*). Целью этого моделирования является оценка распространения дыма и тепла

в гараже, и, на основании этого, оценка эффективности функционирования проектируемой системы противопожарной вентиляции.

Эффективная система пожарной вентиляции – это не только хороший проект, но и его надлежащее исполнение, которое включает в себя полную интеграцию системы с другими устройствами противопожарной безопасности на объекте. До начала эксплуатации объекта, то есть на стадии технической приемки, рекомендуется всеобъемлющая проверка правильности исполнения и эффективности получаемой системы противопожарной вентиляции. Методом, который лучше всего подходит для данной оценки, является метод горячего дыма. В ходе проведения испытаний, имитирующих развитие реального пожара в здании, данный метод позволяет оценить воздушные потоки, вызванные работой системы на объекте, улучшить баланс приточного воздуха из разных точек подачи воздуха и, прежде всего, проверить правильность взаимодействия системы вентиляции с системой пожарной сигнализации вместе с оценкой правильности выполнения сценария пожара.

Настоящее пособие было разработано с учетом международных требований, рассмотренных в разделе 2.2, стандартов проектирования систем противопожарной вентиляции и современных технических знаний, а также опыта Института строительной техники в этой области. Системы противопожарной вентиляции, разработанные в соответствии с рекомендациями, изложенными в главах 4, 5 и 6, должны быть проверены с помощью метода вычислительной гидродинамики (CFD), в соответствии с критериями оценки, изложенными в разделе 3.5, и принципами проведения расчетов, описанными в главе 7.

## **1.2. Предмет и область исследования**

В пособии рассматриваются вопросы выбора систем противопожарной вентиляции в закрытых гаражах и принципы их разработки, оценки и принятия в эксплуатацию. Принципы, изложенные в исследовании, относятся к системам противопожарной вентиляции, используемым в закрытых гаражах, предназначенных для парковки легковых автомобилей. Граничных размеров гаража, в котором можно установить систему противопожарной вентиляции, не существует. Тем не менее, следует подчеркнуть, что в очень низких (менее 2,50 м) гаражах или в гаражах площадью менее 1000 м<sup>2</sup> выполнить эффективную систему противопожарной вентиляции крайне сложно, что связано с относительно небольшим объемом дыма, который может скапливаться под потолком, не ставя под угрозу безопасность эвакуирующихся людей.

В данном пособии представлены, в частности, в соответствии с новейшими техническими знаниями, правила, касающиеся:

- выбора систем противопожарной вентиляции в зависимости от поставленных целей,
- проектирования систем канальной вентиляции (дымоудаления) и струйной (системы контроля за распространением дыма и тепла, а также очистки от дыма),
- определения критериев оценки для отдельных систем противопожарной вентиляции,
- проведения численного анализа с использованием методов вычислительной гидродинамики, с тем чтобы оценить эффективность систем противопожарной вентиляции,
- процедур испытания и приемки систем противопожарной вентиляции.

Данное исследование не относится к гаражам, где используется оборудование для хранения (складирования) транспортных средств. Объекты этого типа характеризуются особенно высоким риском возникновения пожара из-за возможности быстрого развития и достижения максимальной мощности огня. В этом случае необходима разработка индивидуального проекта и критериев оценки.

В главе 2 рассмотрены основные типы систем противопожарной вентиляции и представлены принципы их работы. В главе 3 описаны допущения, важные для всех систем противопожарной вентиляции, независимо от их типа, и общие критерии оценки систем. В главе 4 приведены подробные требования к канальным системам противодымной вентиляции. Главы 5 и 6 посвящены специфическим требованиям к струйным системам



вентиляции, предназначенным для надлежащей очистки от дыма, а также для контроля распространения дыма и тепла. Глава 7 содержит набор требований, связанных с проведением численного моделирования с использованием вычислительной гидродинамики (CFD). В последней главе приведены требования к пуску установок и приемочным процедурам, с особым акцентом на принципы испытаний с горячим дымом.

Данное пособие предназначено, главным образом, проектировщикам и монтажникам противопожарной вентиляции гаражей, специалистам в области противопожарной защиты, инвесторам, в том числе представителям инвесторов и другим лицам, участвующим в процессе проектирования, изготовления и приемки установок противопожарной вентиляции, а также сотрудникам Государственной противопожарной службы.

### 1.3. Термины и определения

**CFD анализ** - анализ распространения дыма и тепла в гараже с использованием метода вычислительной гидродинамики.

**Время начала операции по спасению и тушению пожара** - время, отсчитываемое с момента возникновения пожара до того момента, когда начинается подача огнетушащих струй, включая время, необходимое для разведки пожара и тактического развертывания.

**Время для безопасной эвакуации** - время, отсчитываемое с момента возникновения пожара до момента, когда условия окружающей среды достигают точки превышения принятых предельных значений.

**Автоматическое устройство дымоудаления** - соответствующее требованиям распоряжения [1] устройство, система противопожарной вентиляции, рассматриваемая в пособии. Эти системы должны запускаться автоматически при обнаружении пожара.

**Зона обнаружения** - часть или вся дымовая зона, которой присваивается индивидуальный сценарий действия автоматики для пожаротушения, включая систему противопожарной вентиляции.

**Дымовая зона** - виртуальная или физически отделенная часть пожарного отсека, в пределах которой распространяется дым во время пожара и из которой он удаляется.

**Система контроля дыма и тепла** - система, целью которой является ограничение распространения дыма в определенной области между источником огня и точкой вытяжки, обеспечивающая доступ к источнику огня, свободный от дыма до такой степени, чтобы возможно было подойти к огню на определенное расстояние со стороны притока компенсационного воздушного потока.

**Система очистки от дыма** - система, целью которой является ограничение температуры в пожарном отсеке путем смешивания дыма и горячих газов с входящим компенсационным воздухом, их удаление и очистка пространства от дыма после окончания операций по спасению и пожаротушению.

**Пожарный отсек** - разделенное перегородками с требуемым классом огнестойкости пространство в здании, где может произойти пожар. В проекте системы противопожарной вентиляции предусматривается возможность возникновения одного пожара в одном пожарном отсеке в пределах защищаемого здания.

**Устройство для хранения (складирования) транспортных средств** - устройство или техническое решение, которое позволяет хранить транспортные средства выше или ниже других транспортных средств в пределах одного парковочного места.

**Вентиляция с дымоудалением (система удаления дыма и тепла)** - система противопожарной вентиляции, удаляющая дым и горячие газы непосредственно из-под потолка помещения, которая обеспечивает удержание слоя дыма в четко определенной области выше голов эвакуирующихся.

**Противопожарная вентиляция** - система вентиляции, предназначенная для удаления дыма и горячих газов, которые могут возникнуть в результате пожара, и подачи компенсационного воздуха в необходимом количестве.

**Канальная вентиляция** - система противопожарной вентиляции, основным элементом которой являются распределенные под потолком пожарного отсека каналы (воздуховоды) с вытяжными решетками для удаления дыма и горячих газов, образующихся при пожаре.

**Струйная (джет) вентиляция** - система противопожарной вентиляции, которая может выступать в качестве системы контроля распространения дыма и тепла или очистки от дыма, основным элементом которой являются распределенные под потолком пожарного отсека струйные вентиляторы, направляющие дым и горячие газы по всему сечению гаража к местам вытяжки, откуда они удаляются.

**Время, необходимое для безопасной эвакуации** - время, отсчитываемое от момента возникновения пожара до того момента, когда объект покинет последний эвакуирующийся человек.

**Накопитель дыма** - пространство под потолком пожарного отсека, в котором собирается дым и горячие пожарные газы, откуда они позже удаляются.

*Символы и сокращения, используемые в тексте*

CFD - *Computational Fluid Dynamics*, вычислительная гидродинамика,

FDS - *Fire Dynamics Simulator*, одна из программ, используемых для расчетов CFD,

LES - *Large Eddy Simulation*, модель турбулентного течения,

ГПС - Государственная противопожарная служба,

SHEVS - *Smoke and Heat Exhaust Ventilation System* Система вентиляции с дымоудалением,

СУП - стационарные установки пожаротушения (водяные), например, спринклерная установка.

## 2. СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ГАРАЖЕЙ

### 2.1. Общая информация

Системы противопожарной вентиляции (автоматические устройства дымоудаления), используемые в гаражах, в зависимости от назначения, можно разделить на три типа систем, приведенных в таблице 1. Некоторые из приведенных в ней целей достигаются при использовании различных противопожарных вентиляционных систем, поэтому системы можно также классифицировать по типу оборудования, используемого для достижения поставленной цели (рис. 1). Основными типами систем противопожарной вентиляции в гаражах являются [25]:

- канальная противодымная вентиляция – вентиляция, обеспечивающая удаление дыма из слоя под потолком и сохранение свободного от дыма пространства, в котором можно проводить эвакуацию, аварийно-спасательные операции и пожаротушение,
- система контроля распространения дыма и тепла - система, задача которой - удерживать дым в определенном пространстве между источником огня и местом его удаления таким образом, чтобы обеспечить легкий доступ к источнику пожара аварийно-спасательным командам, в то же время значительно снижая его температуру и концентрацию дыма или токсичных продуктов горения,
- системы очистки от дыма (англ. *Smoke Clearance, dilute*) - система, предназначенная для удаления дыма, смешанного с поступающим компенсационным воздухом, тем самым снижая его температуру и понижая концентрацию дыма и токсичных продуктов горения.

Таблица 1. Назначение систем противопожарной вентиляции в гаражах

Тип системы	Непосредственное содействие эвакуации	Содействие спасательным и пожарным командам		Очистка пространства от дыма после окончания спасательных работ и тушения пожара
		понижение температуры дыма	свободный от дыма доступ к источнику огня	
Канальная вентиляция с дымоудалением	ДА	ДА	ДА	ДА
Система контроля распространения дыма и тепла	НЕТ*	ДА	ДА	ДА
Система очистки от дыма	НЕТ*	ДА	НЕТ	ДА

\* Действие систем задерживается (ограничивается) до момента окончания эвакуации - дым удерживается в накопителе только благодаря выталкивающей силе, позволяя эвакуировать людей, что невозможно в слишком маленьких или слишком низких гаражах.

Если принимать во внимание тип устройств, системы, используемые в закрытых гаражах, делятся на системы воздуховодной (канальной) вентиляции, являющиеся, как правило, системами вентиляции с дымоудалением, и струйной (потокосной) вентиляции, работающей обычно как система контроля над распространением дыма и тепла. Оба типа устройств могут быть использованы в качестве систем очистки от дыма, но на практике большинство систем такого типа – это системы струйной вентиляции. Графическое представление систем противопожарной вентиляции, с обозначением систем, используемых в закрытых гаражах, показано на рисунке 1.

Тип системы	вентиляция с дымоудалением	контроль распространения дыма и тепла	очистка от дыма
Вид устройств	механическая (канальная)	струйная вентиляция	механическая (канальная)
	гравитационная	системы “cross ventilation”	струйная вентиляция
			системы “cross ventilation”

Рис. 1. Классификация систем противопожарной вентиляции по типу систем и видам используемых устройств, с обозначением систем, наиболее часто используемых в закрытых гаражах

Вентиляция с дымоудалением обеспечивает удержание дыма и других продуктов горения на требуемой высоте над путями эвакуации путем удаления их непосредственно из так называемого накопителя дыма. В случае закрытых гаражей типичной системой вентиляции с дымоудалением является канальная вентиляция. В системе такой вентиляции дым удаляется непосредственно из-под пространства потолка дыма через размещенные под ним каналы и вытяжные решетки. Благодаря этому в течение всего времени ее работы видно деление пространства в гараже на два слоя – удерживаемый под потолком слой горячего дыма и безопасный слой чистого воздуха, как показано на рисунке 2.

По-другому работает струйная вентиляция, которая действует как система для контроля распространения дыма и тепла, или как система очистки от дыма. В этих системах воздух транспортируется по всему сечению гаража к выбранным точкам вытяжки. Так как активация системы приводит к резкому смешиванию дыма с чистым воздухом на большом пространстве гаража, ее полное приведение в действие задерживается до завершения эвакуации. Разница между системами контроля над распространением дыма и тепла и системами очистки от дыма состоит в эффективности ограничения распространения дыма в гараже. Системы для контроля распространения дыма и тепла обеспечивают удержание дыма в четко определенном, ограниченном пространстве между источником огня и местом вытяжки, что облегчает проведение аварийно-спасательных работ и пожаротушения.

Системы очистки от дыма, также называемые системами разбавления дыма, - наименее эффективное решение противопожарной вентиляции закрытых помещений, особенно гаражей. Поскольку производительность систем этого типа невелика, защищенное пространство может наполниться дымом, при этом как его концентрация, так и температура должны быть ограничены до такой степени, чтобы не представлять непосредственной угрозы для жизни людей, которые могут в нем оказаться.

Принципы работы системы очистки от дыма представлены на рис. 3, а система контроля распространения дыма и тепла - на рис. 4.

Основными элементами, входящими в систему противопожарной вентиляции, являются:

- вентиляторы вытяжные, приточные и струйные,

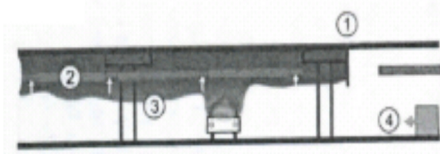
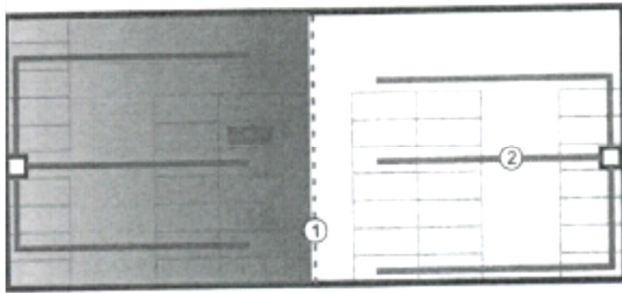
- основные приточно-вытяжные каналы,
- вертикальные и горизонтальные каналы противопожарной вентиляции с вентиляционными решетками,
- противопожарные и запорные клапаны,
- контроллеры устройств, щиты управления и контроля, блоки питания и преобразователи частоты и другие связанные с ними элементы пожарной автоматики.

Помимо основных элементов системы противопожарной вентиляции, на ее эксплуатацию оказывают существенное влияние:

- дымовые завесы (шторы) - ограничивают область, в которой может распространяться дым, из-за чего дым, находящийся в этой области, может иметь более высокую температуру и более высокую массовую концентрацию продуктов горения, а его удаление может быть более эффективным,
- существенные препятствия под потолком гаража, которые во многих случаях могут сработать как дымовые завесы, также могут вызвать локальное опадание дыма в зону пребывания людей,
- противопожарные ворота и другие противопожарные преграды - за счет ограничения распространения огня и дыма, а также как перекрытие путей нежелательного потока воздуха в область, из которой удаляется дым,
- система пожарной сигнализации - путем контроля над сценарием работы устройств при пожаре, в частности, путем контроля последовательности запуска отдельных компонентов системы,
- стационарные водяные установки пожаротушения (например, оросительная – спринклерная - установка) - за счет ограничения мощности возникшего пожара, что также приводит к уменьшению количества и температуры дыма при пожаре.

Независимо от выбранной системы противопожарной вентиляции, к проекту (не позднее, чем на этапе исполнительного проекта) должна прилагаться четкая графическая документация в формате А3 или А4, в которой должно присутствовать деление объекта на дымовые зоны, расположение основных компонентов системы вместе с возможными вариантами их работы (и указанием, например, производительности или силы тяги устройств, состояния открытия или закрытия клапанов), с тем чтобы можно было быстро и просто сопоставить проект с представленными численными расчетами или наблюдениями во время приемки. Проект также должен сопровождаться документацией в виде рисунка или таблиц, показывающей, каким образом действуют элементы системы для сценариев в различных дымовых зонах.

## Система вентиляции с дымоудалением

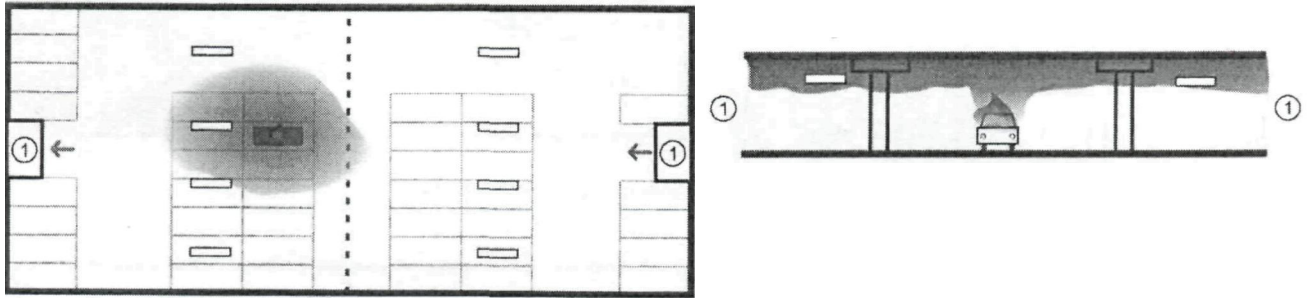


1. зонирование дыма при помощи дымовых завес
2. дым, удаляемый через решетки, расположенные на воздуховодах
3. четкое разделение на слои горячего дыма под потолком и слой, свободный от дыма
4. компенсирующий воздух, подаваемый таким образом, чтобы не вызвать опускания дыма

Рис. 2. Принцип действия системы канальной противодымной вентиляции

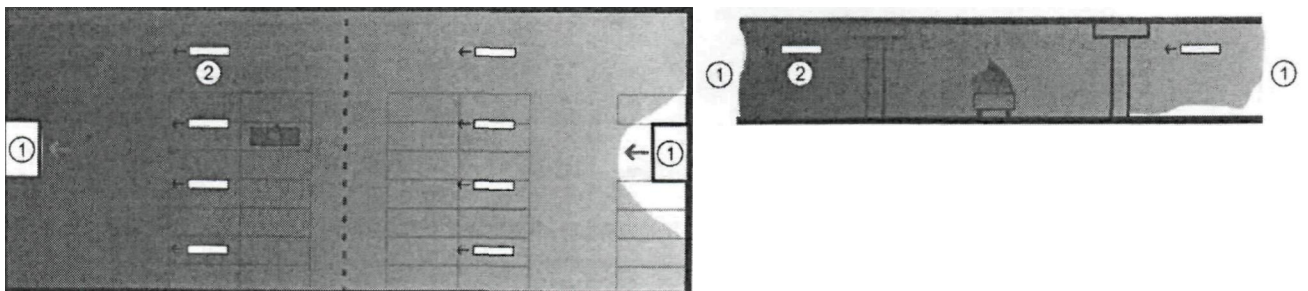
## Система струйной вентиляции - очистки от дыма

### I этап – эвакуация



В отведенное для эвакуации время работают только приточные и вытяжные ① вентиляторы таким образом, чтобы дым естественным образом оставался в слое под потолком гаража.

### II этап – аварийно-спасательные работы и тушение пожара



После завершения эвакуации запускаются струйные вентиляторы, вследствие чего весь гараж заполняется разбавленным дымом, температура которого ограничена.

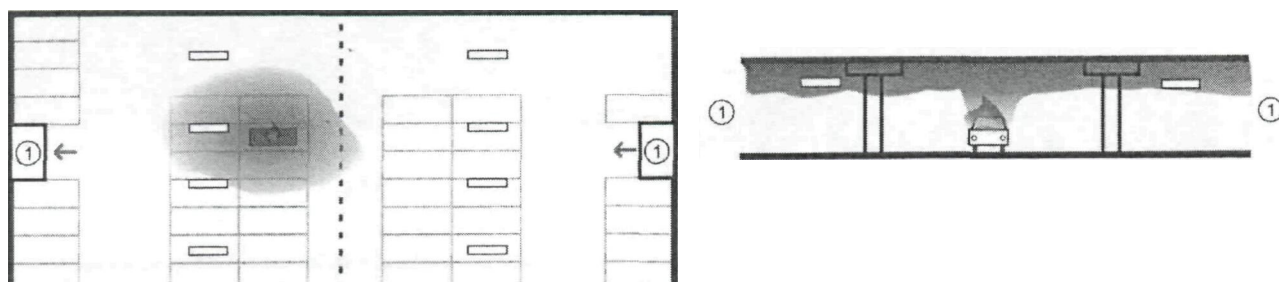
- ① Основные точки: приток воздуха и вытяжка
- ② струйные вентиляторы, помещенные под потолком

Рис. 3. Принцип действия системы струйной вентиляции, работающей как система очистки от дыма



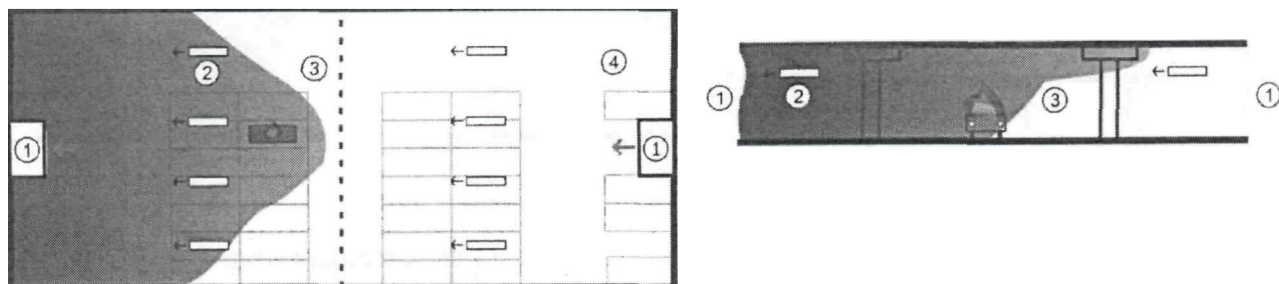
## Система струйной вентиляции – контроль распространения дыма и тепла

### I этап – эвакуация



В отведенное для эвакуации время работают только приточные и вытяжные ① вентиляторы таким образом, чтобы дым естественным образом оставался в слое под потолком гаража.

### II этап – аварийно-спасательные работы и тушение пожара



После завершения эвакуации запускаются струйные вентиляторы, распространение дыма ограничено пространством между источником пожара и местом вытяжки.

- ① основные точки: приток воздуха и вытяжка
- ② струйные вентиляторы, помещенные под потолком
- ③ распространение дыма задерживается благодаря созданию в гараже соответствующей скорости воздушного потока
- ④ свободный от дыма путь доступа к очагу пожара для аварийно-спасательных и пожарных команд

Рис. 4. Принцип действия системы струйной вентиляции, работающей как система контроля распространения дыма и тепла

## **2.2. Источники технических знаний в области противопожарной вентиляции гаражей**

Требования, предъявляемые к системам противопожарной вентиляции в закрытых гаражах, являются предметом многочисленных научных исследований, инструкций и зарубежных стандартов. Среди работ, опубликованных в нашей стране, наиболее полным является учебник [21]. Что касается иностранных положений, то разнообразие требований и их прямая связь с национальной правовой системой стран, для которых они были разработаны, вызывает проблемы в их применении на территории Польши. Использование различных стандартов и избирательное выполнение их требований может стать причиной неэффективной работы спроектированной системы противопожарной вентиляции. Кроме того, отсутствие четких рекомендаций по оценке этих систем вызывает проблемы с оценкой того, соответствуют ли принятые решения требованиям национального законодательства. Тем не менее, зарубежные стандарты и разработки - это ценный источник знаний, который стоит использовать при полном понимании содержащихся в них требований, ограничений и связи с другими нормативными документами, принятыми в странах их происхождения.

К наиболее важным источникам знаний в описываемой области следует отнести стандарты проектирования, разработанные BS [11], NEN [12] и NBN [13]. Плюсом этих документов, безусловно, является сфера их применения, в том числе, в частности, гаражи для легковых автомобилей. Недостатком же является недостаточная согласованность с польскими нормами, таким образом, их прямое и неизбирательное применение может вызвать проблемы при удовлетворении польских строительных норм и правил.

Еще одна группа документов, касающихся различных систем противопожарной вентиляции, - это стандарты NFPA [14, 15] и VDI [16, 17]. Эти документы напрямую не касаются закрытых гаражей, но представленные в них принципы и методы действия являются универсальными и могут оказаться также полезными для проектировщиков противопожарной вентиляции закрытых гаражей. Проектировщик должен иметь в виду, что не все положения этих документов имеют отношение к польской действительности (например, указанное в стандарте [16] время прибытия спасательных команд). В уже упомянутых рекомендациях VDI [16, 17] также затронуты вопросы, связанные с оценкой и приемкой систем противопожарной вентиляции. Среди документов, которые затрагивают вопросы, связанные с приемкой, также заслуживают внимания австралийские [18] и сингапурские [19] рекомендации.

Полезным документом при проектировании систем вентиляции являются британские рекомендации по расчету времени эвакуации людей [20]. Тема этого документа не связана напрямую с системами противопожарной вентиляции, но любой анализ, целью которого будет получить подтверждение того, что были выполнены функциональные требования § 270 пункт 1 распоряжения [1] требует ссылки на время эвакуации из объекта. Точно так же правильное определение задержки запуска системы струйной вентиляции также требует оценки времени окончания эвакуации.

### 3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

#### 3.1. Выбор системы

Выбор системы противопожарной вентиляции для анализируемого объекта имеет ключевое значение в контексте применения системы. Система вентиляции с дымоудалением может использоваться во всех типах гаражей, независимо от размера пожарного отсека. Точно так же система струйной вентиляции, действующая как система контроля распространения дыма и тепла, может использоваться во всех типах гаражей, независимо от размера пожарного отсека, причем при проектировании системы такого типа следует помнить о возможных проблемах, связанных с ее использованием в здании со сложной архитектурой.

Системы струйной вентиляции, действующие как системы очистки от дыма, могут использоваться в гаражах, в которых вероятность одновременного присутствия большого числа пользователей невелика (обычно это здания ZL IV и V). Максимальная площадь гаража, в котором разрешается использование системы очистки от дыма, составляет 5000 м<sup>2</sup>, что соответствует максимальной допускаемой распоряжением [1] площади пожарного отсека гаража, без увеличений. Максимальная площадь одной дымовой зоны в системах такого типа не должна превышать 2600 м<sup>2</sup>. В гаражах большей площади и в объектах, в которых вероятно наличие большого количества пользователей одновременно (например, ZL I, III), вместо системы очистки от дыма следует использовать систему струйной вентиляции, действующую как система контроля распространения дыма и тепла либо систему вентиляции с дымоудалением.

Система струйной вентиляции, действующая как система очистки от дыма, является наименее эффективным решением для противопожарной вентиляции гаража и, следовательно, не должна быть резервным решением, представляемым в пожарно-технической экспертизе в смысле § 2 пункт 1 распоряжения [1] или в заявке на отступление от строительных норм и правил в смысле § 9 Закона о строительстве [24]. Это означает, что объекты, в которых конструкторы обязались обеспечить уровень безопасности выше минимального, следует использовать системы канальной вентиляции с дымоудалением или системы контроля распространения дыма и тепла.

При выборе системы противопожарной вентиляции также важна высота гаража. Опыт ИСТ в этой области свидетельствует о том, что минимальная высота гаража, рекомендуемая при разработке эффективных систем противопожарной вентиляции, составляет 2,90 м, при этом в случае систем канальной вентиляции с дымоудалением в гараже такой высоты установка системы может оказаться невозможной из-за размеров каналов, необходимых для требуемой производительности системы. При выборе системы необходимо учитывать локальные уменьшения высоты потолка. Рекомендуется, чтобы их общая площадь по отношению к площади горизонтальной проекции гаража не превышала 20%. Такого рода препятствия должны быть отражены в численной модели гаража, выполненной для анализа с использованием методов вычислительной гидродинамики.

Использование системы противопожарной вентиляции в гараже ниже 2,90 м также возможно, если путем CFD анализов, проведенных в соответствии с рекомендациями, содержащимися в главе 7, будет доказано, что уменьшенная высота гаража не повлияет на снижение стандартов безопасности в здании и что в требуемое время не будут нарушены критерии оценки, изложенные в главе 3.

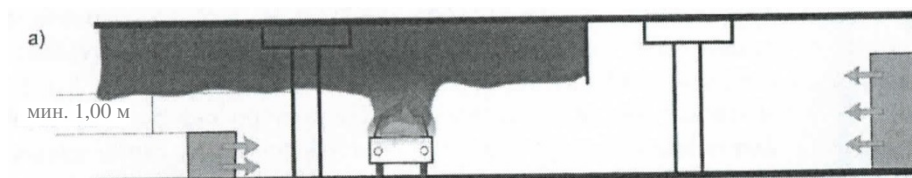
Системы пожарной вентиляции можно использовать в гаражах, оборудованных автоматическими стационарными водяными установками пожаротушения (например, спринклерными установками). Наличие постоянного устройства пожаротушения существенно влияет на мощность пожара, который может возникнуть в гараже, что непосредственно переносится на требуемую производительность системы, как описано в главах 4, 5 и 6. В гаражах, где присутствует как установка противопожарной вентиляции, так и стационарное устройство пожаротушения, его элементы, такие как спринклеры, тепловые

детекторы и т.д., не должны устанавливаться в местах, где в то время, которое необходимо для их запуска, они будут подвергаться воздействию воздушного потока, вызванного действием противопожарной вентиляции, со скоростью более 1 м/с. Во многих проектах по монтажу стационарных водяных средств пожаротушения предполагается, что работа системы противопожарной вентиляции не вызовет задержки запуска спринклерной установки. В связи с вышеуказанными проблемами, оба проекта должны быть согласованы между собой. В обоснованных случаях, в отношении систем струйной вентиляции запуск струйных вентиляторов или других компонентов системы противопожарной вентиляции в гараже может быть отложен до момента получения сигнала от контрольного клапана сигнализации спринклерной системы.

### **3.2. Приток компенсационного воздуха**

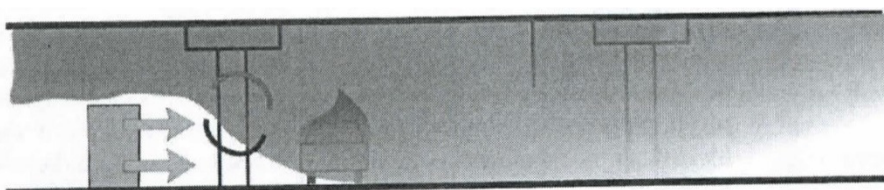
В системах вентиляции с дымоудалением в течение всего срока действия системы и в системах струйной вентиляции в необходимое для эвакуации людей время компенсационный воздух должны поступать в дымовую зону, охваченную пожаром, таким образом, чтобы не происходило смешивание поступающего воздуха с горячим дымом, находящимся под потолком. Результатом неправильной подачи компенсационного воздуха может быть стремительное смешивание дыма с поступающим воздухом, из-за чего он теряет свою плавучесть, и его невозможно будет удалить из-под потолка очищаемого яруса.

В типичных случаях верхняя граница приточной решетки должна находиться на высоте не более 1,8 м, а воздух должен подаваться со скоростью не более 2,0 м/с. В низких гаражах и в местах локального уменьшения высоты потолка компенсационный воздух должен подаваться на высоте не менее 1,00 м ниже ожидаемой нижней границы дымового слоя. По истечении времени, необходимого для эвакуации людей, можно изменить способ подачи компенсационного воздуха на такой, при котором компенсационный воздух подается на большей высоте и с большей скоростью, если цель действия системы, связанная с работой аварийно-спасательных и пожарных команд, будет достигнута и подтверждена путем численного анализа в соответствии с правилами, изложенными в главе 7. Не следует использовать точки притока воздуха в дымовую зону, охваченную огнем прямо в перекрытии. Примеры правильного и неправильного способа подачи компенсационного воздуха показаны на рисунке 5.



В зоне, охваченной огнем, не менее 1,00 м ниже слоя дыма, максимальная скорость притока = 2,00 м/с

В других дымовых зонах: без ограничения местоположения, высоты или скорости, если это не влияет отрицательно на работу системы (требуется проверка с использованием метода CFD).



Подача воздуха, которая происходит слишком высоко или слишком быстро, приводит к тому, что он смешивается с дымом, теряется стратификация и, следовательно, гараж заполняется дымом.

Рис. 5. Правильный (а) и неправильный (б) способ подачи компенсационного воздуха

В гаражах, в которых выезд ведет непосредственно к внешней стороне здания, предпочтительным источником компенсационного воздуха являются открытые внешние ворота. Преимущество такого решения заключается, в первую очередь, в довольно большой площади отверстия, что позволяет воздуху поступать с низкой скоростью потока. Кроме того, внешние ворота, как правило, являются самым быстрым путем для разведки и начала спасательной операции и пожаротушения, а также не вызывает задымления надземных этажей здания (что может случиться при необходимости действовать через лестничные клетки при закрытых гаражных воротах). Рядом с внешними воротами, являющимися источником компенсационного воздуха, не следует размещать вытяжные точки системы, чтобы избежать явления затягивания чистого наружного воздуха в вытяжную точку вместо удаления дыма.

Компенсационный воздух может подаваться и в другие дымовые зоны, помимо той, которая охвачена огнем, без каких-либо ограничений высоты, на которой размещен источник, или ограничения скорости воздушного потока, если CFE анализ подтвердит, что такое решение не вызывает неблагоприятного распространения дыма в пространстве гаража.

Следует избегать ситуаций, когда в герметичном закрытом гараже компенсационный воздух обеспечивается исключительно с помощью механических средств. Установление одного, постоянного соотношения количества подаваемого воздуха по отношению к количеству удаляемого воздуха невозможно из-за быстро меняющихся условий окружающей среды во время пожара. В крайних случаях приток слишком большого количества компенсационного воздуха может привести к тому, что давление воздуха в пожарном отсеке гаража будет выше, чем на ведущих к нему лестничных клетках. Для того, чтобы избежать этого явления, рекомендуется, чтобы общее количество воздуха, подаваемого в гараж механическим способом, не превышало 80% от объема воздуха, удаляемого из гаража при нормальных условиях. Остальное недостающее количество воздуха должно быть подано в гараж гравитационным способом, например, через открытые внешние гаражные ворота или дополнительные каналы, соединяющие гараж с внешней стороной здания.

Дополнительную информацию о способах подачи компенсационного воздуха и влиянии скорости его притока на смешивание с дымом, можно найти в работе [16].

### 3.3. Упрощенный сценарий работы системы

Отдельные элементы системы противопожарной вентиляции должны приводиться в действие в следующем порядке:

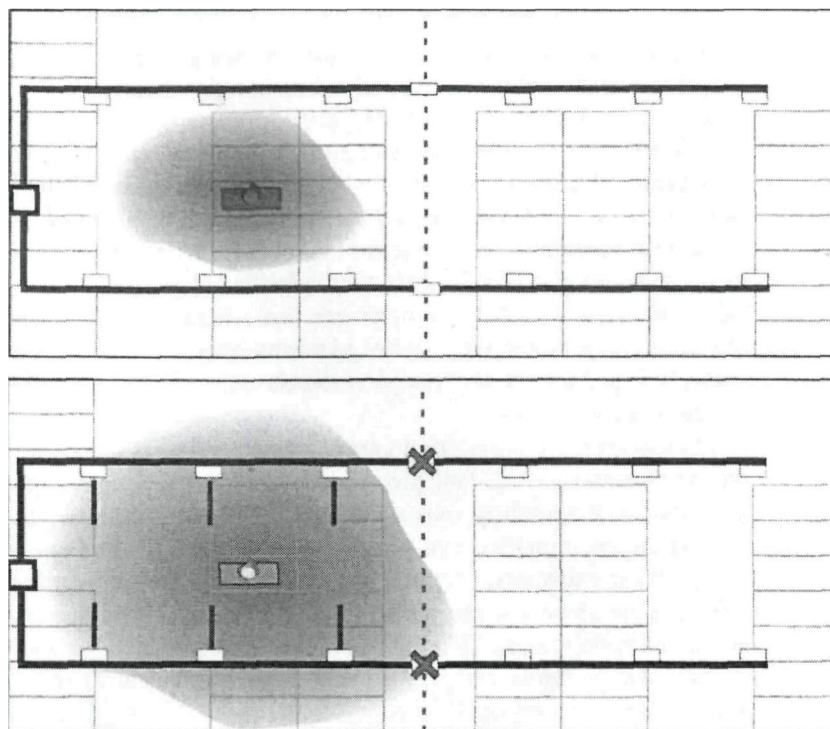
- остановка системы бытовой вентиляции,
- отделение пожарных отсеков (пожарные ворота, двери), опускание автоматических дымовых завес (штор), управления противопожарными клапанами, входящими в систему противопожарной вентиляции,
- открытие гравитационных источников компенсационного воздуха (например, внешних ворот или клапанов на гравитационных воздуховодах),
- запуск вытяжных и приточных вентиляторов на полную или ограниченную мощность.

Для струйных систем вентиляции по истечении времени, предусмотренного для эвакуации людей, вытяжные и приточные вентиляторы должны быть запущены на полную мощность.

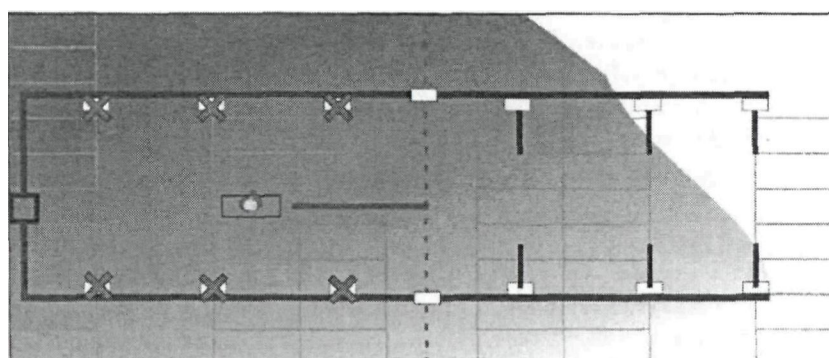
В сценарии запуска элементов системы противопожарной вентиляции самое важное - чтобы запуск вытяжных или приточных вентиляторов всегда следовал после перенаправления дроссельных и противопожарных клапанов. Попытка управления клапанами во время работы вентиляторов обычно приводит к выходу из строя какого-то из устройств и может создать опасную ситуацию, представляющую прямую угрозу для людей, которые находятся в непосредственной близости от элементов устройства.

Если это не является намерением проектировщика, необходимо гарантировать, чтобы система противопожарной сигнализации выполняла сценарий только для первого обнаруженного места пожара. Неприемлемой является ситуация, когда после утечки небольшого количества дыма в соседнюю дымовую зону система пытается остановить работу противопожарной вентиляции, чтобы реализовать сценарий для следующей зоны. Ход и последствия такого события показаны на рисунке 6.

В зданиях, где площадь пожарного отсека гаража превышает  $10\,000\text{ м}^2$ , возле помещения, где находится панель системы пожарной сигнализации, рекомендуется изготовить мнемосхемы, изображающие проекции отдельных ярусов гаража с визуализацией текущего направления действия системы и зоной, в которой был обнаружен пожар. На такой информационной панели может также отображаться рекомендованный путь входа в гараж, определенный в результате проведенных на этапе разработки проекта численных расчетов распространения дыма и тепла. Это решение должно облегчить проведение спасательных операций и тушение пожара на объекте, а также - путем определения областей, свободных от дыма - повысить безопасность спасательных и пожарных команд.



После обнаружения пожара происходит запуск системы в дымовой зоне, охваченной огнем, и отсечка установки в соседней зоне.



Проникновение небольшого количества дыма в соседнюю дымовую зону вызывает обнаружение пожара в этой зоне. Из-за отсутствия блокировки противопожарного сценария может произойти остановка работы системы и запуск системы вентиляции в соседней зоне. Дым перетекает в ранее безопасную зону.

Рис. 6. Неправильное начало работы системы, заключающееся в том, что не был заблокирован противопожарный сценарий для первой дымовой зоны, в которой был обнаружен пожар

- улучшить условия для ведения аварийно-спасательных работ и тушения пожара путем ограничения температуры дыма и косвенно ограничение распространения пожара из-за теплового излучения от слоя горячего дыма:

- предполагаемый поток теплового излучения от слоя дыма не более  $15 \text{ кВт} / \text{м}^2$  в зоне от 5 м и далее от источника тепла и дыма, а также не более  $5 \text{ кВт} / \text{м}^2$  в зоне от 15 м и далее в период времени, включенный в CFD анализ,

- предполагаемая температура дыма не выше  $120^\circ \text{C}$  на высоте 1,50 м над уровнем пола во всем пространстве гаража за исключением области на расстоянии 15 м от источника тепла и дыма в период времени, включенный в CFD анализ.

Кроме того, система контроля над распространением дыма и тепла должна обеспечить доступ к очагу пожара со стороны притока компенсационного воздуха путем удержания зоны, свободной от дыма, на расстоянии до 15 м от источника огня и дыма между, по

меньшей мере, одним из входов в гараж и источником огня и дыма в период времени, включенный в анализ CFD.

Таблица 2. Критерии оценки

Критерий	Вентиляция с дымоудалением	Контроль распространения дыма и тепла	Очистка от дыма
Во время эвакуации			
Температура	под потолком - 200° С на высоте до 1,80 м - 60 ° С		
Задымленность	дым удерживается под потолком яруса, на высоте до 1,80 м - 0,105 г/м <sup>3</sup> (дальность видимости знаков эвакуации, излучающих свой собственный свет - 10 м)		
Излучение	менее 2,5 кВт/м <sup>2</sup> по направлению к полу		
Во время проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения			
Температура	на высоте 1,50 м менее 120° С на расстоянии 15 м от источника огня		
Задымленность	на высоте 1,50 м до 0,105 г/м <sup>3</sup> (дальность видимости знаков эвакуации, излучающих свой собственный свет - 10 м) на расстоянии 15 м от источника пожара	зона может быть задымлена	
Излучение	до 15 кВт/м <sup>2</sup> на расстоянии 5 м от источника огня со стороны доступа к пожару 5 кВт/м <sup>2</sup> в пределах 15 м от источника огня		
Доступ к источнику огня	дым в два слоя - источник огня виден и доступ к нему упрощен	возможен доступ к источнику огня на расстоянии 15 м от его локализации, путем, свободным от дыма	вся площадь зоны задымлена – пожарный отсек должен быть достаточно мал, чтобы возможно было быстрое обнаружение и локализация пожара



## 4. КАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ С ДЫМОУДАЛЕНИЕМ

### 4.1. Определение требуемой производительности системы

Принимая во внимание принцип работы системы вентиляции с дымоудалением, описанный в главе 2, в гараже следует определить две области действия системы, то есть, слой, свободный от дыма, и накопитель дыма (подпотолочный слой). Высота слоя, свободного от дыма, должна составлять 0,8 от высоты этажа, но не менее 2,20 м.

Производительность системы вентиляции с дымоудалением должна определяться согласно расчетам, приведенным ниже. Используемые в формулах значения конвекционной силы огня ( $Q_c$ ) и периметра пожара ( $P$ ) зависят от оборудования гаража стационарными водяными установками пожаротушения. Эти значения составляют:

$Q_c$  - в гараже без стационарных водяных установок пожаротушения 5600 кВт (суммарная мощность 8000 кВт), в гараже со стационарными водяными установками пожаротушения 2800 кВт (суммарная мощность 4000 кВт);

$P$  - в гараже без стационарных водяных установок пожаротушения - 20 м, в гараже со стационарными водяными установками пожаротушения - 14 м.

По мнению авторов, в гаражах высотой до 3,50 м производительность системы вентиляции с дымоудалением, получаемая путем простых аналитических расчетов, не всегда достаточна для того, чтобы удовлетворить функциональные критерии оценки системы. Поэтому предлагается коэффициент безопасности для аналитических расчетов, равный  $\psi = 1,30$ .

Порядок расчета требуемой производительности системы представляет собой три шага, описанные ниже. Результаты расчетов в виде графика, в зависимости от принятой высоты слоя, свободного от дыма, показаны на рисунке 7.

*Шаг 1. Определение массового расхода струи дыма, поступающей в накопитель дыма*

$$M = 0,188 \cdot P \cdot Y^3$$

где:

$M$  - массовый расход струи дыма, поступающей в накопитель дыма [кг/с]

$P$  - периметр пожара [м]

$Y$  - высота слоя, свободного от дыма [м].

*Шаг 2. Определение прогнозируемого повышения температуры в верхнем слое дыма*

$$\Theta = \frac{Q_c}{c_p \cdot M}$$

где:

$Q_c$  - конвективная мощность пожара [кВт],

$c_p$  - удельная теплоемкость воздуха [кДж /кг • К],

$M$  - массовый расход струи дыма, поступающей в накопитель дыма [кг/с]

$\Theta$  - ожидаемое повышение температуры дыма, поступающего в накопитель [К].

Если прогнозируемое повышение температуры превышает 550° С, то это означает возможность загорания. Тогда нужно использовать решения, ограничивающие силу огня (например, стационарные водяные установки пожаротушения или увеличение производительности системы вентиляции с дымоудалением).

*Шаг 3. Определение производительности системы вентиляции с дымоудалением*

$$V = M \cdot \frac{\Theta + T_0}{\rho_0 \cdot T_0} \cdot \psi \cdot 3600$$

где:

$V$  - производительность системы вентиляции с дымоудалением [м<sup>3</sup>/ч]

$M$  - массовый расход струи дыма, поступающей в накопитель дыма [кг/с]

$\Theta$  - ожидаемое повышение температуры дыма, поступающего в накопитель [К]

- $T_0$  - температура окружающей среды [K]  
 $\rho_0$  - плотность воздуха при температуре окружающей среды [кг/м<sup>3</sup>]  
 $\psi$  - коэффициент безопасности, рекомендуемое значение 1,3.

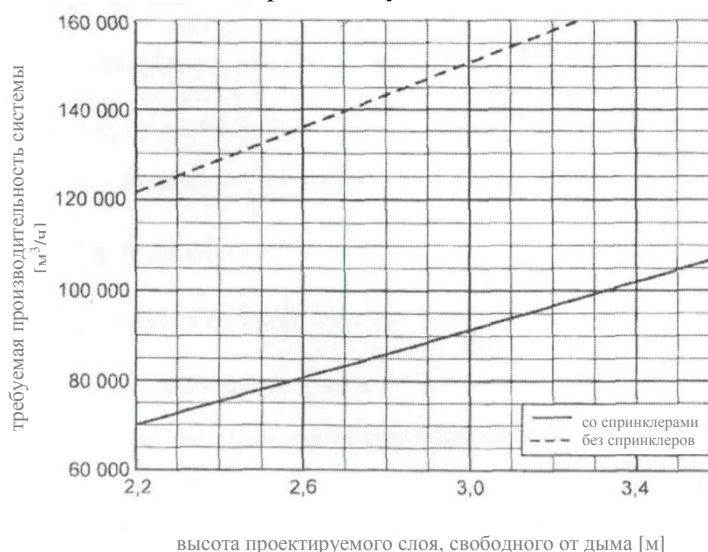


Рис. 7. Необходимая производительность системы вентиляции с дымоудалением в зависимости от высоты слоя, свободного от дыма

Пример 1: *Гараж высотой 3,00 м, оборудованный спринклерной установкой*

$$M = 0,188 \cdot P \cdot Y^{\frac{3}{2}} = 0,188 \cdot 14 \cdot (3 \cdot 0,8)^{\frac{3}{2}} = 9,78 \text{ kg/s}$$

$$\Theta = \frac{Q_c}{c_p \cdot M} = \frac{2800}{1,01 \cdot 9,78} = 283 \text{ K}$$

$$V = M \cdot \frac{\Theta + T_0}{\rho_0 \cdot T_0} \cdot \psi \cdot 3600 = 9,78 \cdot \frac{283 + 293}{1,2 \cdot 293} \cdot 1,3 \cdot 3600 = 74900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Пример 2: *Гараж высотой 3,00 м, не оборудованный спринклерной установкой*

$$M = 0,188 \cdot P \cdot Y^{\frac{3}{2}} = 0,188 \cdot 20 \cdot (3 \cdot 0,8)^{\frac{3}{2}} = 13,98 \text{ kg/s}$$

$$\Theta = \frac{Q_c}{c_p \cdot M} = \frac{5600}{1,01 \cdot 13,98} = 396 \text{ K}$$

$$V = M \cdot \frac{\Theta + T_0}{\rho_0 \cdot T_0} \cdot \psi \cdot 3600 = 13,98 \cdot \frac{396 + 293}{1,2 \cdot 293} \cdot 1,3 \cdot 3600 = 128300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Пример 3: *Гараж высотой 3,50 м, оборудованный спринклерной установкой*

$$M = 0,188 \cdot P \cdot Y^{\frac{3}{2}} = 0,188 \cdot 14 \cdot (3,5 \cdot 0,8)^{\frac{3}{2}} = 12,33 \text{ kg/s}$$

$$\Theta = \frac{Q_c}{c_p \cdot M} = \frac{2800}{1,01 \cdot 12,33} = 225 \text{ K}$$

$$V = M \cdot \frac{\Theta + T_0}{\rho_0 \cdot T_0} \cdot \psi \cdot 3600 = 12,33 \cdot \frac{225 + 293}{1,2 \cdot 293} \cdot 1,3 \cdot 3600 = 85000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Пример 4: *Гараж высотой 3,50 м, не оборудованный спринклерной установкой*

$$M = 0,188 \cdot P \cdot Y^{\frac{3}{2}} = 0,188 \cdot 20 \cdot (3,5 \cdot 0,8)^{\frac{3}{2}} = 17,61 \text{ kg/s}$$

$$\Theta = \frac{Q_c}{c_p \cdot M} = \frac{5600}{1,01 \cdot 17,61} = 314 \text{ K}$$

$$V = M \cdot \frac{\Theta + T_0}{\rho_0 \cdot T_0} \cdot \psi \cdot 3600 = 17,61 \times \frac{314 + 293}{1,2 \cdot 293} \cdot 1,3 \cdot 3600 = 142500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### 4.2. Разделение гаража на дымовые зоны

Максимальная площадь одной дымовой зоны не должна превышать 2600 м<sup>2</sup>. Дымовые зоны большего размера допустимы, если общая производительность системы вентиляции будет увеличена пропорционально частному от деления площади зоны и размера 2600 м<sup>2</sup>, а эффективность системы будет подтверждена с использованием численных расчетов и метода CFD в соответствии с рекомендациями, содержащимися в главе 7.

*Пример:*

Гараж имеет площадь 4000 м<sup>2</sup>. Производительность системы рассчитывается в соответствии с методом, описанным в разделе 4.1, и составляет 120 000 м<sup>3</sup>/ч. Производительность для дымовой зоны площадью 4000 м<sup>2</sup> составляет:

$$V = 120000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{4000 \text{m}^2}{2600 \text{m}^2} = 184600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

На границе дымовых зон следует использовать постоянные или опускаемые автоматически при обнаружении пожара дымовые шторы, нижний край которых будет располагаться на 10 см ниже прогнозируемой высоты слоя, свободного от дыма.

#### 4.3. Размещение вытяжных решеток

Вытяжные решетки должны быть расположены на расстоянии от 5 м до 15 м друг от друга, а производительность на одной решетке не должна превышать 4600 м<sup>3</sup>/ч. Решетки рекомендуется устанавливать на боках каналов противодымной вентиляции. Вытяжные решетки в гараже должны быть распределены равномерно.

Если решетки установлены снизу каналов противодымной вентиляции, максимальную производительность на одной решетке, при которой не должно происходить затягивание чистого воздуха из-под дыма слоя, которое показано на фотографии 1, следует определить по формуле:

$$V_{\text{maks.}} = \frac{4,16 \gamma d^{\frac{5}{2}} \left( \frac{T_s - T_0}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}}}{A}$$

где:

- $V_{\text{max}}$  - максимальный объемный расход потока через вытяжную решетку, не вызывающий явления затягивания [м<sup>3</sup>/с],
- $\gamma$  - коэффициент размещения вытяжки со значением 1,0 для решеток, удаленных от стены на расстояние, более чем в два раза превышающее их характеристический размер,
- $d$  - глубина слоя дыма ниже самой низкой точки вытяжки [м],
- $T_s$  - прогнозируемая температура дыма в подпотолочном слое [K]
- $T_0$  - температура окружающей среды [K]

Действие эффективной система вентиляции с дымоудалением показано на фото 2.

Компенсационный воздух должен поступать в дымовую зону, охваченную пожаром, в соответствии с требованиями, приведенными в главе 3.

Блок-схема процесса проектирования системы вентиляции с дымоудалением гаража представлена на рисунке 8.

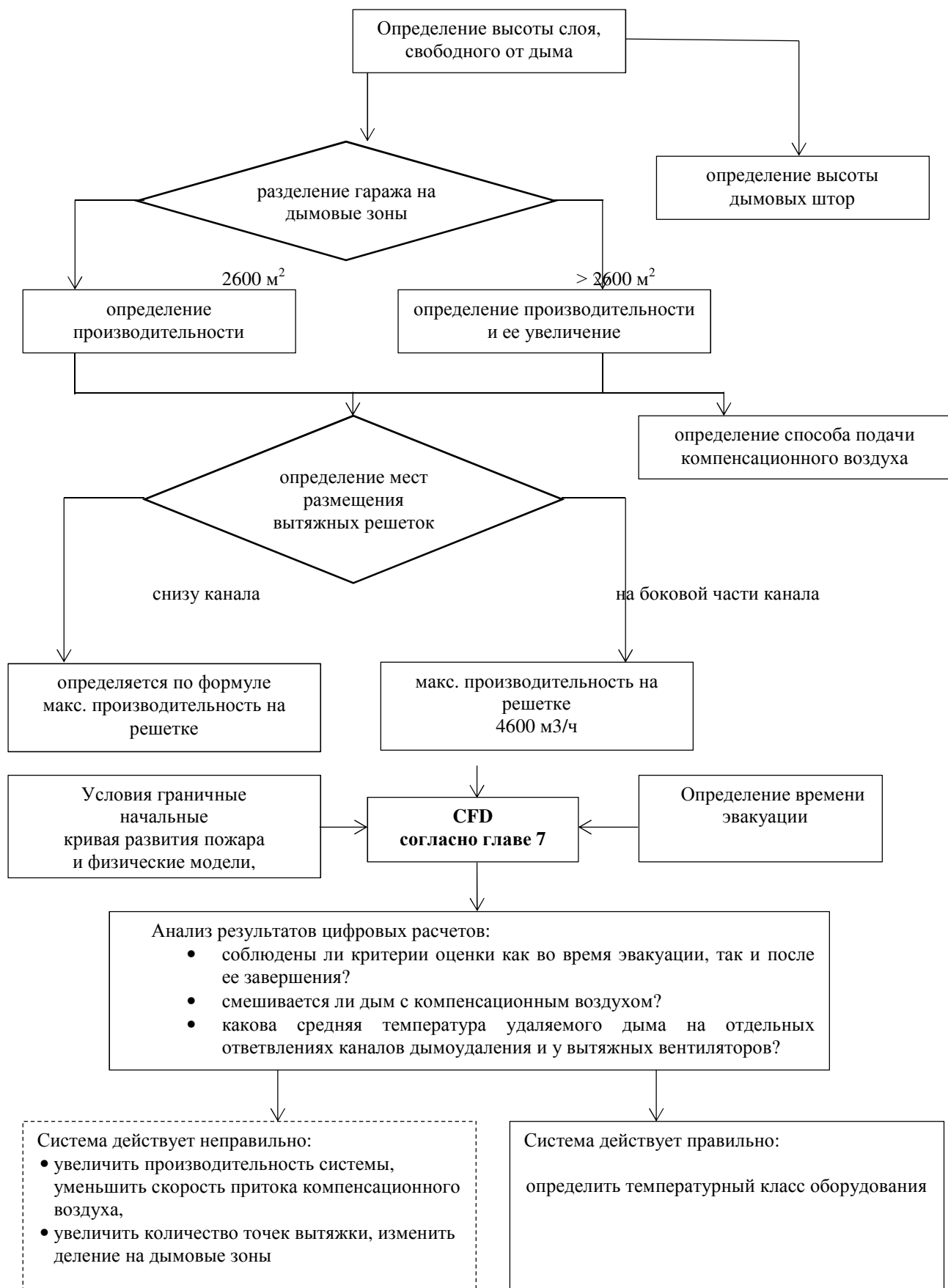


Рис. 8. Блок-схема процедуры проектирования системы вентиляции с дымоудалением



Фото 1. Вытяжная решетка, на которой наблюдается явление затягивания чистого воздуха



Фото 2. Система вентиляции с дымоудалением, работающая эффективно, на переднем плане видно четкое разделение на задымленный слой и свободный от дыма, на втором плане виден источник пожара и генераторы горячего дыма

## 5. СИСТЕМА СТРУЙНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ, ДЕЙСТВУЮЩАЯ КАК СИСТЕМА ОЧИСТКИ ОТ ДЫМА

Согласно тому, что изложено в главе 2, системы струйной вентиляции, действующие как системы очистки от дыма, являются наименее эффективным решением противопожарной вентиляции в гаражах. Данного типа системы дают возможность эвакуировать людей, тогда как дым удерживается под потолком гаража столько времени, сколько необходимо для эвакуации, а затем происходит понижение температуры дыма путем смешивания его с поступающим компенсационным воздухом и удаление в выбранных точках вытяжки. Эти системы могут использоваться в гаражах, где вероятность одновременного присутствия многих людей невелика, то есть в гаражах под жилыми домами и местами коллективного проживания.

Минимальная производительность системы струйной вентиляции, действующей как система очистки от дыма, должна составлять  $160\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$  в каждой дымовой зоне. Максимальная площадь дымовой зоны не должна превышать  $2600\ \text{м}^2$ , а любой из ее размеров не должен превышать 60 м. Следует учитывать, что в очень маленьких гаражах, ширина которых не превышает 30 м, производительность в  $160\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ , может быть избыточной. Струйные вентиляторы следует размещать под потолком дымовой зоны таким образом, чтобы они приводили в движение воздух по всему пространству гаража, не допуская нигде застоя воздуха.

В период времени, предназначенный для эвакуации людей, должны приводиться в действие только пункты вытяжки и притока, и их производительность ограничивается таким образом, чтобы поток воздуха, вызванного их работой, не приводил к оседанию дыма в места, где могут находиться люди. Как выглядит дым, удерживающийся под потолком гаража, не подвергая опасности людей во время эвакуации, показано на фото 3.

Запуск струйных вентиляторов должен происходить после истечения установленного срока эвакуации, считая с момента объявления пожарной тревоги. Следует помнить, что запуск чрезмерного количества струйных вентиляторов, приводящих в движение большой объем воздуха, чем способна удалить точка вытяжки, может привести к неэффективному удалению дыма.

Класс эффективности вытяжных вентиляторов должен определяться в соответствии с требованиями, изложенными в главе 3.4, при этом в гаражах, не оснащенных спринклерной системой, или если производительность системы составляет менее  $180\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ , не рекомендуется принимать класс устройств ниже, чем  $F_{400}120$ .

Компенсационный воздух должен поступать в дымовую зону, охваченную огнем, в соответствии с требованиями, изложенными в главе 3.

Блок-схема процесса проектирования системы струйной вентиляции, действующей как система очищения от дыма, представлена на рисунке 9.





Фото 3. Дым, удерживающийся под потолком яруса в течение времени, установленного для эвакуации людей, на заднем плане виден источник тепла и дыма

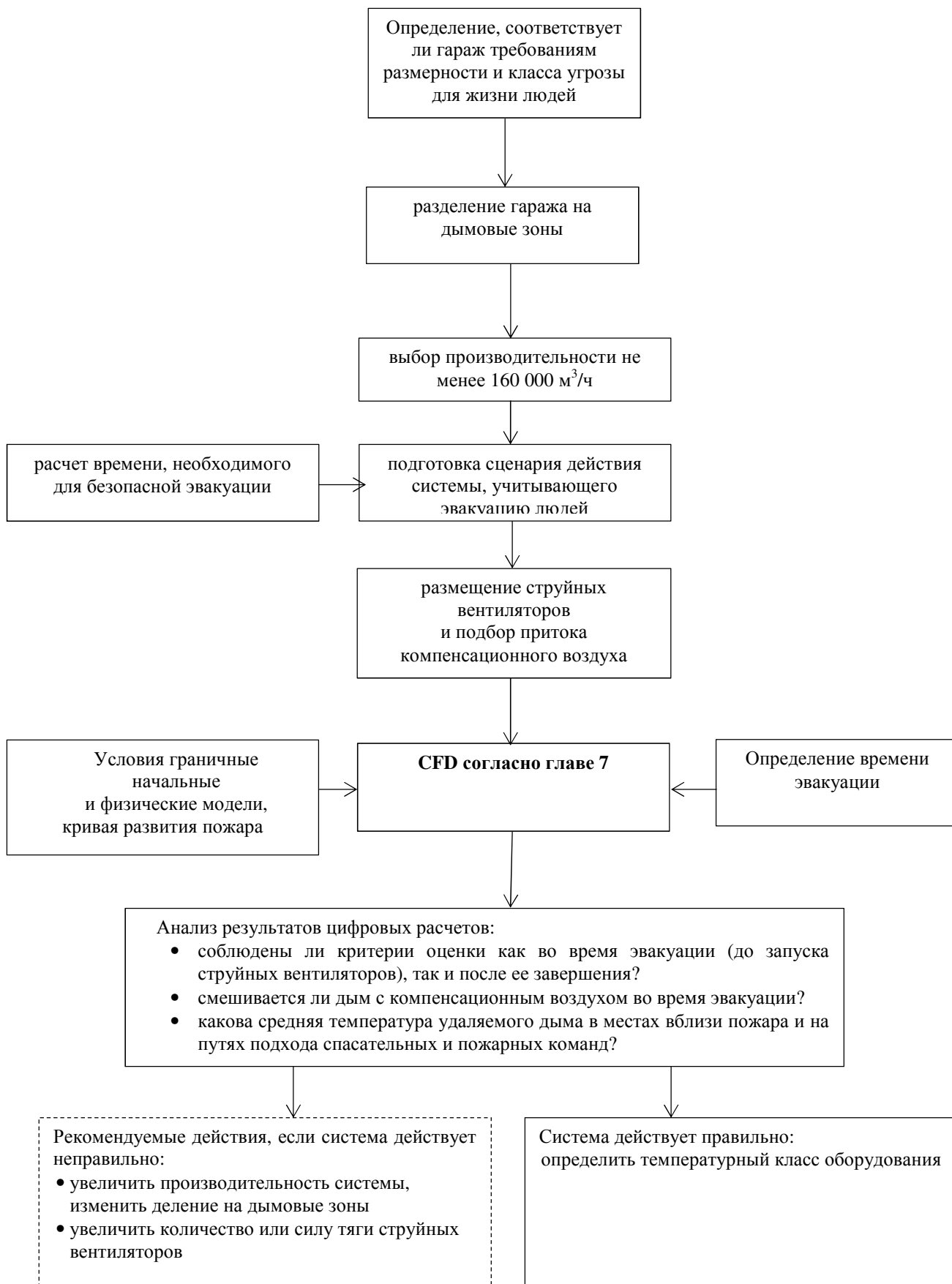


Рис. 9. Блок-схема процедуры проектирования системы струйной вентиляции, действующей как система очистки от дыма



## 6. СИСТЕМА СТРУЙНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ, ДЕЙСТВУЮЩАЯ КАК СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЫМА И ТЕПЛА

### 6.1. Определение размеров системы

Правильный выбор и определение параметров системы струйной вентиляции, действующей как система контроля распространения дыма и тепла, трудно и даже невозможно обеспечить с помощью простых математических соотношений. Удержание дыма в заданной области возможно при использовании воздушного потока, противодействующего распространению дыма. Его скорость должна быть достаточной, чтобы предотвратить обратный поток дыма. Границы дымовых зон, между которыми удалось обеспечить контроль над распространением дыма, показаны на фото 4.



Фото 4. Распространение дыма остановлено на границе между дымовыми зонами

Поддержание такой высокой скорости по всей ширине большого гаража представляется практически невозможным из-за огромного количества воздуха, необходимого для достижения такой цели. По этой причине проектирование систем струйной вентиляции, действующих как система контроля распространения дыма и тепла, можно дифференцировать в зависимости от формы и ширины гаража.

В случае гаражей, по форме близких к прямоугольнику, производительность системы должна быть выбрана таким образом, чтобы в любом поперечном сечении гаража (в том числе, прежде всего, на границах дымовых зон), средняя скорость воздуха составляла не менее 0,9 м/с в гаражах, не оборудованных стационарными водяными установками пожаротушения (СУП), или 0,7 м/с в гаражах, оборудованных ими. Номограммы предлагаемой производительности системы в гаражах определенной ширины и высоты представлены на рисунках 10 и 11.

В случае гаражей большого размера или сложной формы система должна быть выбрана таким образом, чтобы в любом сечении, в котором следует поддерживать контроль дыма и тепла, средняя скорость воздуха составляла не менее 0,9 м/с в гаражах, не оборудованных стационарными водяными установками пожаротушения (СУП), или 0,7 м/с в гаражах, оборудованных ими. На практике оценка размера секции, в которой следует сохранять контроль над распространением дыма и тепла, и, следовательно, проектирование системы струйной вентиляции, действующей как системы контроля распространения дыма и тепла, если использовать только аналитические методы – сложная задача. Принятые значения производительности системы всегда должны проверяться с помощью методов CFD в соответствии с требованиями, изложенными в главе 7.

Опыт ИСТ в проверке систем противопожарной вентиляции свидетельствует о том, что на начальном этапе реализации проекта производительность системы контроля распространения дыма и тепла на объектах большого размера или нетипичной формы должна быть не менее 300 000 м<sup>3</sup>/ч в гаражах, оборудованных стационарными водяными установками пожаротушения, и 400 000 м<sup>3</sup>/ч в гаражах, не оборудованных ими. Эти значения следует рассматривать в проекте в качестве «отправной точки», а затем, на основе результатов численных расчетов с использованием метода CFD, увеличивать или уменьшать их, приспособляя систему к требованиям конкретного объекта.

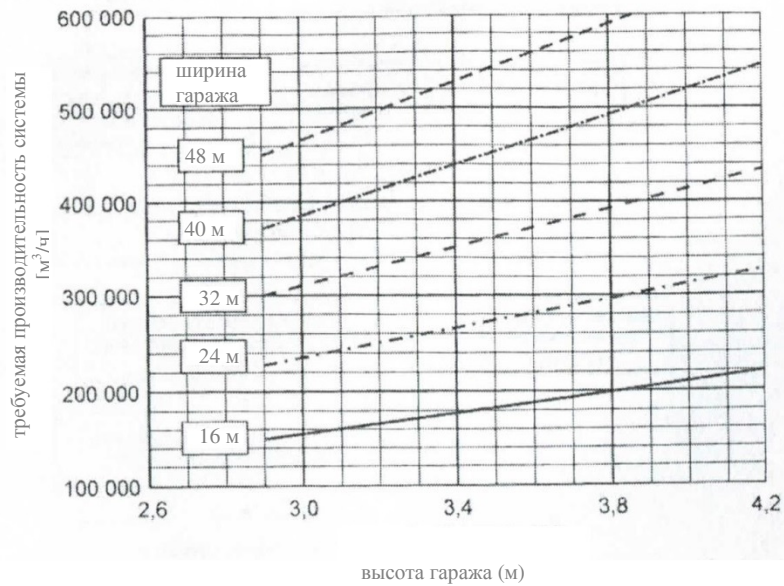


Рис. 10. Производительность системы струйной вентиляции, необходимая для поддержания контроля дыма и тепла, в зависимости от ширины и высоты гаража, для гаражей, не оборудованных СУП

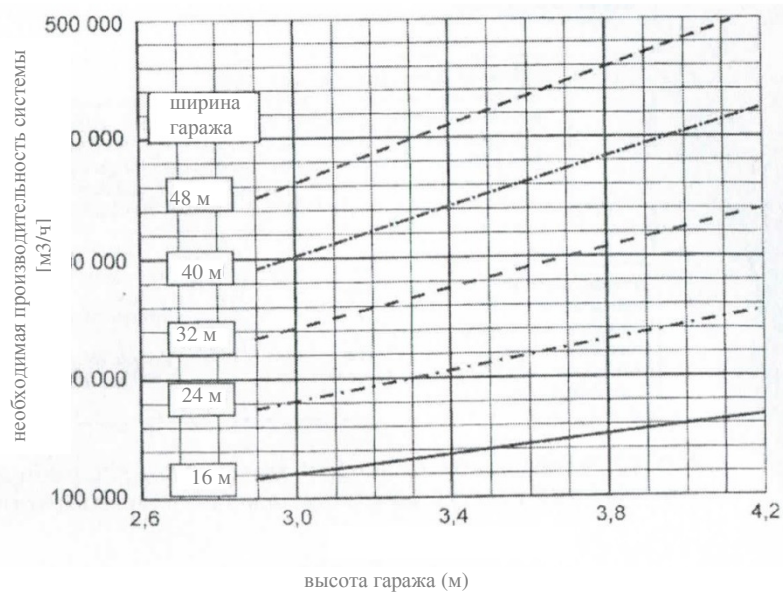


Рис. 11. Производительность системы струйной вентиляции, необходимая для поддержания контроля дыма и тепла, в зависимости от ширины и высоты гаража, для гаражей, оборудованных СУП

## 6.2. Разделение гаража на дымовые зоны и размещение оборудования

Максимальная площадь одной дымовой зоны не должна превышать 5000 м<sup>2</sup>. Одна отдельная точка вытяжки не должна обслуживать более одной дымовой зоны, при этом допускается разделение дымовой зоны на зоны обнаружения, чтобы дифференцировать сценарии действия струйных вентиляторов и точек притока компенсационного воздуха с целью оптимизации работы системы.

Струйные вентиляторы должны быть расположены на расстоянии не более 48 м друг от друга в направлении действия вентилятора и 12 м в направлении, перпендикулярном к направлению действия вентилятора, или согласно другим конкретным инструкциям поставщика системы, представленным в ясной форме в проекте системы. Как и в случае с системами очистки от дыма, запуск чрезмерного количества струйных вентиляторов, приводящих в движение большой объем воздуха, чем способна удалить точка вытяжки, может привести к тому, что дым начнет двигаться в обратном направлении и распространяться по всему пространству гаража.

Размещение струйных вентиляторов имеет особое значение, когда на территории гаража расположены помещения, например, лестничные клетки или вестибюли, ведущие к движущимся пешеходным дорожкам. При наличии небольших препятствий возможен вынос дыма с обеих сторон препятствия, для широких пространств может потребоваться деление на дымовые зоны и обтекание препятствия с одной или с другой стороны. Струйные реверсивные вентиляторы могут иметь различные характеристики расхода потока в зависимости от направления действия.

Струйные вентиляторы, используемые в режиме бытовой вентиляции, не должны иметь слишком большую силу тяги (более 25 Н). Слишком сильное воздействие вентиляторов в режиме бытовой вентиляции может привести к переносу дыма, образовавшегося на ранней стадии пожара, далеко от места возникновения пожара или к возникновению воздушного потока, имеющего скорость более 1 м/с, вблизи разбрызгивателей или тепловых детекторов, задерживая их срабатывание.

Класс эффективности вытяжных вентиляторов должен определяться в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 3.4, при этом в гаражах, не оснащенных спринклерной системой, или с производительностью системы менее 180 000 м<sup>3</sup>/ч, он должен быть не меньше, чем F<sub>400</sub>120.

Дефлекторы струйных вентиляторов должны быть установлены под таким углом, чтобы поток воздуха омывал элементы конструкции здания, а движение воздуха, вызванное его действием, должно происходить по всему сечению гаража. Визуализация потока воздуха, создаваемого действием струйного вентилятора и дефлектора, представлена на фотографии 5.



Фото 5. Визуализация воздушного потока, возникающего под действием струйного вентилятора, оснащенного дефлектором

### **6.3. Сценарий действия системы**

В период времени, предназначенный для эвакуации людей, должны приводиться в действие только пункты вытяжки и притока, и их производительность ограничивается таким образом, чтобы поток воздуха, вызванного их работой, не приводил к оседанию дыма в места, где могут находиться люди. Компенсационный воздух должен подаваться в дымовую зону, охваченную пожаром, как это указано в главе 3, то есть так, чтобы не вызвать смешивания дыма, удерживаемого под потолком, с поступающим компенсационным воздухом.

Блок-схема процесса проектирования системы струйной вентиляции, действующей как система контроля распространения дыма и тепла, представлена на рисунке 12.

Запуск струйных вентиляторов должен осуществляться по истечении установленного времени эвакуации, считая с момента объявления пожарной тревоги. В гараже высотой более 2,90 м удержание дыма под потолком во время эвакуации не должно быть проблемой, если распространение дыма не будет нарушено архитектурными элементами или оборудованием. Собственные исследования авторов пособия показывают, что удержание дыма под потолком этажа во время пожара мощностью около 1 МВт возможно в течение 9-10 мин.

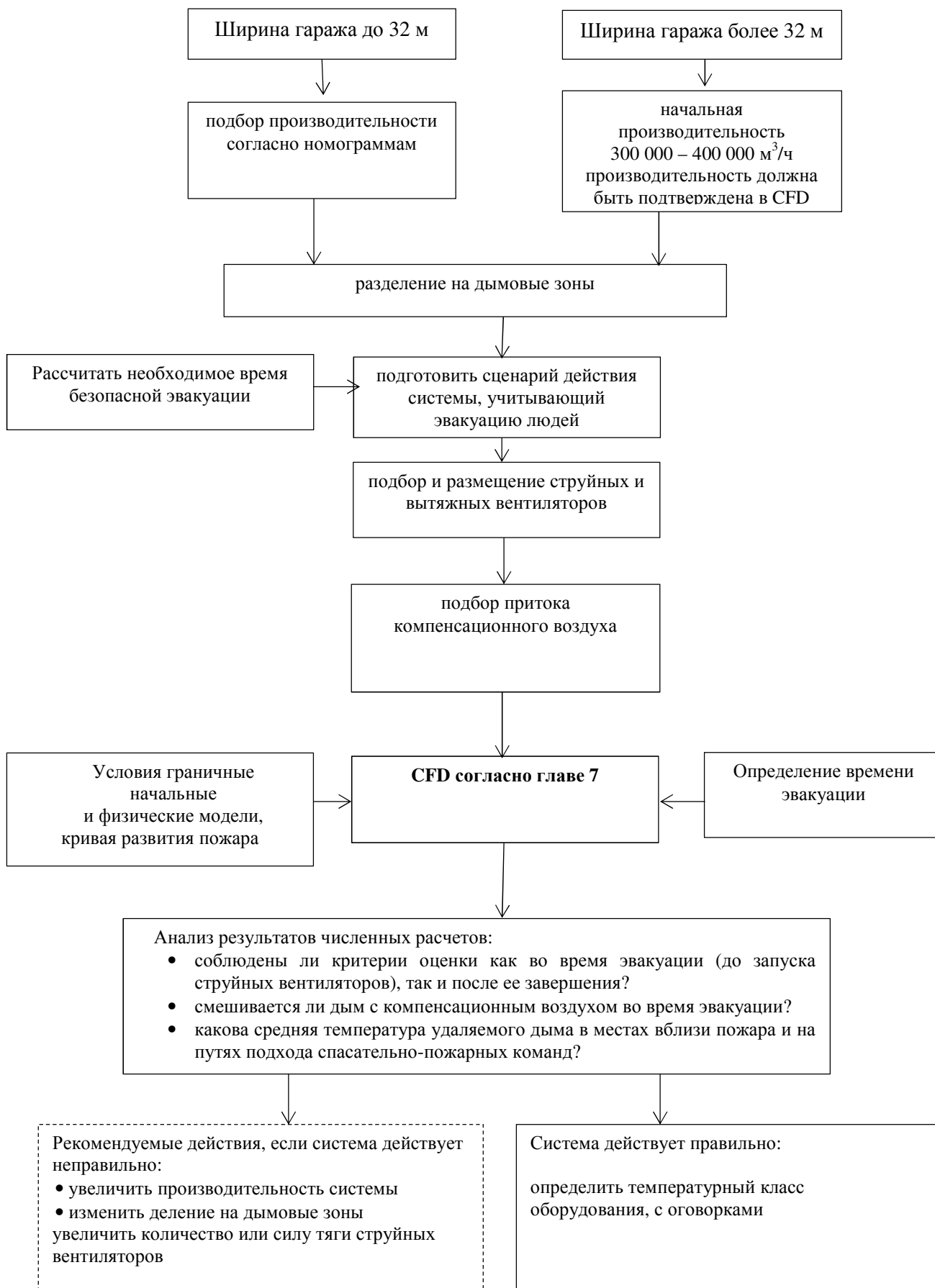


Рис. 12. Блок-схема процедуры проектирования системы струйной вентиляции, действующей как система контроля распространения дыма и тепла



Визуализация эффективного функционирования системы контроля распространения дыма и тепла показана на рисунке 13. На нем видно, как система через 7 минут после начала пожара в самое короткое время ограничивает распространение дыма и тепла в небольшой зоне между пожаром и точкой вытяжки.

$t = 420$  сек. (момент включения струйных вентиляторов)

$t = 480$  сек.

$t = 600$  сек.

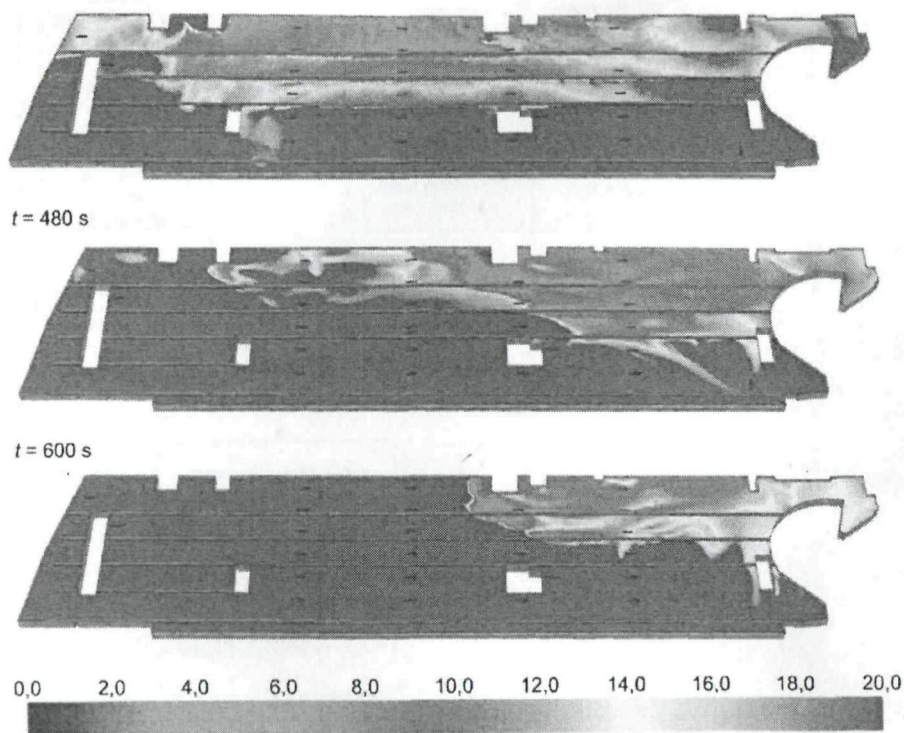


Рис. 13. Проекция, показывающая прогнозируемую локальную дальность видимости на высоте около 2,00 м над полом гаража на 420, 480 и 600 сек. (s) работы системы  
Запуск струйных вентиляторов произошел вскоре после 420 с анализа; на рисунках видно, как быстро система осуществила ограничение распространения дыма и тепла

## 7. CFD АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЫМА И ТЕПЛА В ГАРАЖАХ

### 7.1. Метод CFD

Применение метода вычислительной гидродинамики (CFD) в качестве инструмента для оценки эффективности системы теперь стало неотъемлемой частью большинства проектов систем противопожарной вентиляции гаражей. Постоянное увеличение вычислительной мощности персональных компьютеров и доступность необходимого программного обеспечения вызвало в последние годы как заметный рост количества субъектов, которые занимаются цифровым анализом, касающимся противопожарной безопасности, так и популяризацию самого анализа. В данной публикации не будут рассматриваться ключевые основания проведения CFD анализа, так как предполагается, что лица, проводящие цифровые расчеты, которые являются доказательством эффективности работы систем противопожарной вентиляции, имеют соответствующие знания и навыки, необходимые для их проведения.

CFD анализ основан на решении дифференциальных уравнений, описывающих поток массы и энергии в исследуемой системе, разделенной на конечное число малых объемов, в подробно описанных последовательных временных шагах. Решение уравнений дает значения давления, температуры, плотности, скорости потока, концентрации дыма и т.п., известные для каждого объема в исследуемой системе, в каждый момент анализа. Поэтому CFD анализы являются столь хорошим инструментом в руках инженера, позволяя «заглянуть» в любое место в испытываемом здании и оценить преобладающие там условия окружающей среды. Дополнительную информацию об основах использования метода CFD в анализах, проводимых для целей противопожарной безопасности, можно найти в публикациях [22-24], [26-29].

Хорошо сделанный CFD анализ требует тщательного выбора физических моделей и граничных условий, которые имеют решающее значение для результатов расчета. Ниже описывается выбор:

- значения параметров пожара,
- модели теплового излучения,
- модели турбулентного потока,
- граничных условий

и способ представления результатов численных расчетов.

Чтобы результат численного анализа мог послужить основой для оценки эффективности системы противопожарной вентиляции, необходимо определить четкие и точные граничные значения выбранных параметров, таких как:

- температура дыма,
- массовая концентрация дыма или дальность видимости в дыму,
- тепловое излучение,
- концентрация опасных веществ, образовавшихся в результате пожара.



## 7.2. Этапы CFD анализа

Численный анализ с использованием методов вычислительной гидродинамики состоит из четырех основных этапов:

- подготовка анализа, так называемая *pre-processing*, включающая в себя:
  - определение цели и объема анализа,
  - определение области анализа,
  - определение пограничных областей,
  - создание трехмерной численной модели анализируемого пространства,
  - разделение модели с использованием сетки вычислений,
  - выбор соответствующего метода решения,
  - выбор физических моделей, описывающих анализируемую проблему,
  - определение свойств материалов;
- начало расчетов, включающее в себя:
  - определение граничных условий,
    - определение начальных условий,
    - задание переменных,
    - установление критериев для сходимости решений;
- проведение расчетов с проверкой правильности решений и контролем выполнения критерия сходимости решений;
- оценка результатов анализа, так называемая *post-processing*, в том числе:
  - проверка соответствия полученных результатов с критериями оценки,
  - в случае отрицательного результата расчетов коррекция допущений и возврат к этапу подготовки анализа,
  - подготовка чертежей и таблиц, представляющих результаты анализа,
  - обработка результатов анализа в виде итогового отчета.

Ход анализа представлен в виде блок-схемы на рисунке 14.

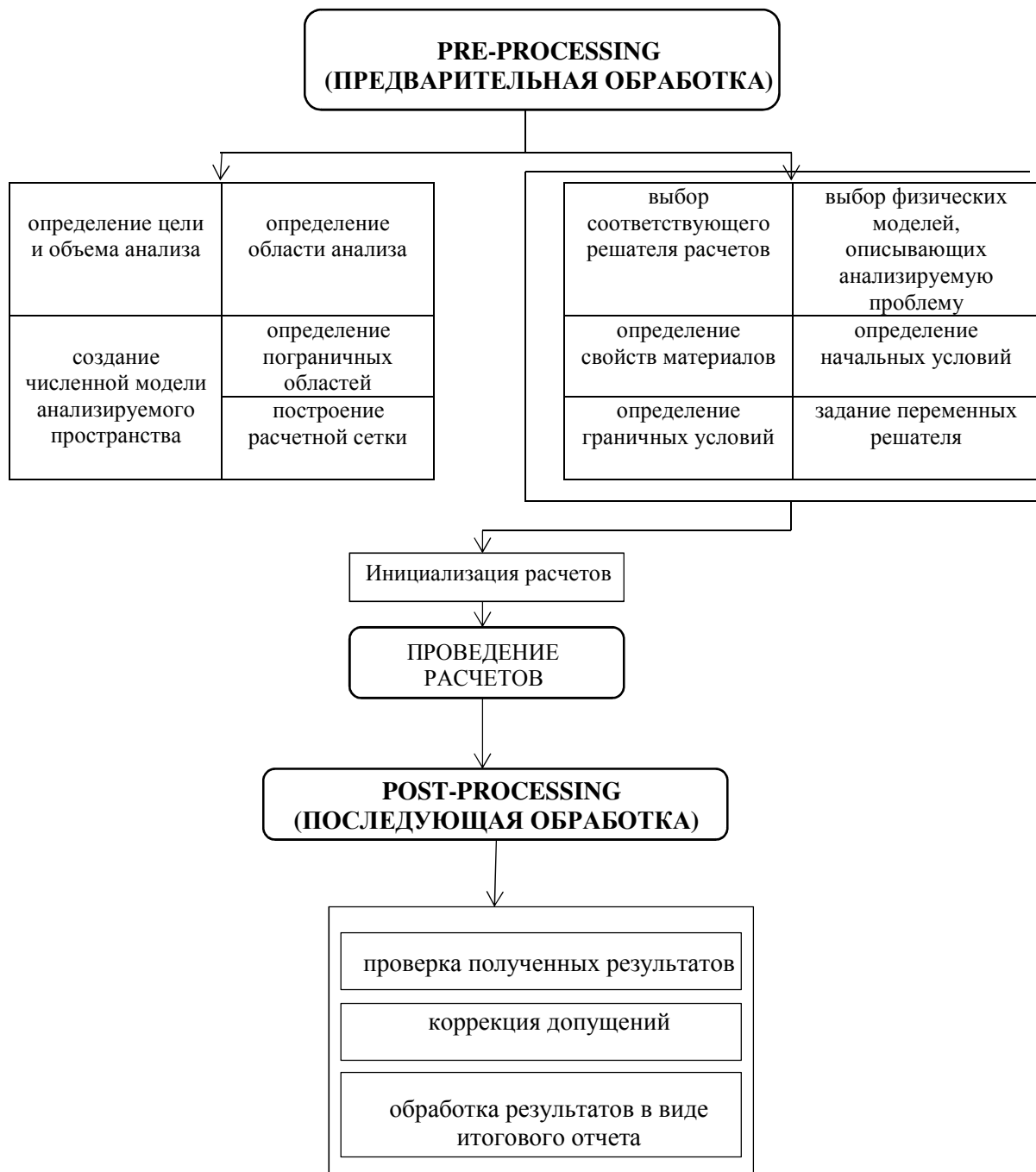


Рис. 14. Схема действий при проведении численных расчетов с использованием метода CFD

### 7.3. Объем анализа и выбор сценариев

Анализ должен охватывать репрезентативные для исследуемой системы противопожарной вентиляции сценарии развития пожара, при этом, если количество дымовых зон в испытываемом объекте больше чем 3, то количество изученных сценариев должно быть не меньше 3.

Анализ можно считать репрезентативным по отношению к большему количеству дымовых зон, если имеется сходство в форме и размерах дымовых зон, расположении и параметрах устройств, входящих в систему противопожарной вентиляции и очередности их запуска.

Исследуемые сценарии развития пожара должны включать наиболее неблагоприятное вероятное развитие пожара в гараже, что обычно означает пожар вблизи границы дымовых зон на максимальном расстоянии от точки вытяжки или в месте, откуда - из-за архитектурных особенностей - удаление дыма может быть проблематичным (например, место, загороженное стеной от притока компенсационного воздуха, угол гаража, место, скрытое за архитектурной преградой).

Разработанная модель гаража должна быть трехмерной, охватывать все пространство пожарной зоны гаража и отражать все возможные детали строительных конструкций, которые нужно принимать во внимание, и самые крупные элементы оборудования. Предельный размер препятствий (диаметр, высота), которые могут быть проигнорированы при создании модели, составляет 20 см.

Примеры расчетных сеток на элементах систем противопожарной вентиляции показаны на рисунках 15-16. На рисунке 17 показан пример численной модели гаража.

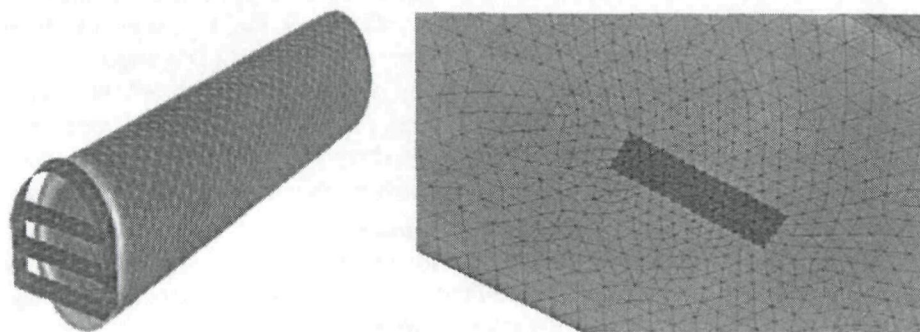


Рис. 15. Пример численной модели струйного вентилятора с правильно установленной числовой сеткой

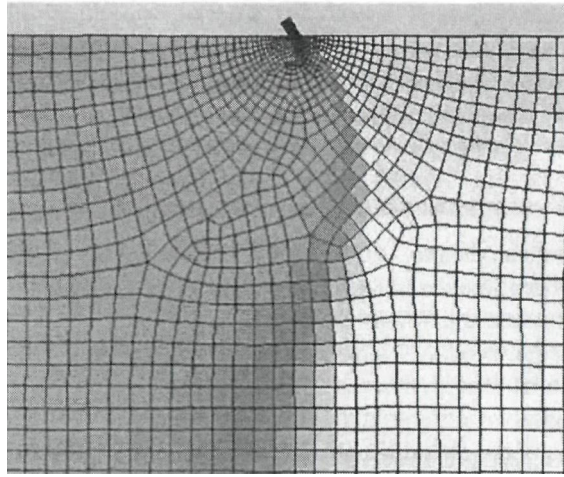


Рис. 16. Пример увеличения плотности числовой сетки рядом со щелевым диффузором

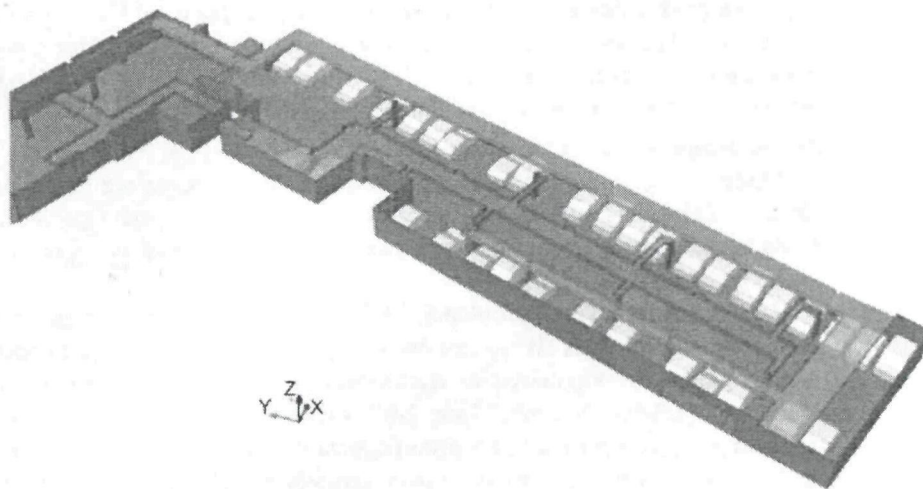


Рис. 17. Фрагмент численной модели гаража с наглядным воспроизведением каналов вентиляции с дымоудалением

Модель пространства должна быть разделена с использованием вычислительной сетки таким образом, чтобы не влиять на результат расчета. Максимальный размер элемента вблизи источника тепла и дыма вентиляционной системы или элементов системы вентиляции не должен превышать 20 см. Кроме того, сетка на поверхности элементов системы противопожарной вентиляции должна содержать не менее 5 элементов в каждом направлении. В остальных случаях следует проводить анализ чувствительности решения к размеру числовой сетки, то есть повторять расчеты со все меньшей числовой сеткой, вплоть до отсутствия замечаемого влияния дальнейшего снижения размерности сетки на результаты расчетов.

#### 7.4. Требования, предъявляемые к используемым вычислительным средствам

Программное обеспечение CFD, используемое при анализах, выходящих за пределы основных уравнений механики жидкостей, должно включать в себя:

- изменчивость параметров во времени,
- модель теплообмена за счет теплопроводности, конвекции и излучения,
- модель турбулентного потока,
- модель обмена компонентов смеси,
- модель очага пожара (источник тепла и дыма или модель горения).

##### ***Модель теплообмена путем излучения***

Модель излучения должна дать возможность воспроизвести потоки излучения, обращенного из дымового слоя в направлении пола. Коэффициент поглощения света для дыма должен быть в пределах от 0,5 до 0,7. Перенос энергии путем излучения имеет решающее значение для правильного понимания движения потоков во время пожара из-за высокой температуры и высокого коэффициента поглощения света дымом.

##### ***Модель турбулентного потока***

Модель турбулентного потока должна состоять не менее чем из двух уравнений. Рекомендуется использовать модель  $k-\epsilon$ , с помощью которой решаются уравнения сохранения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности.

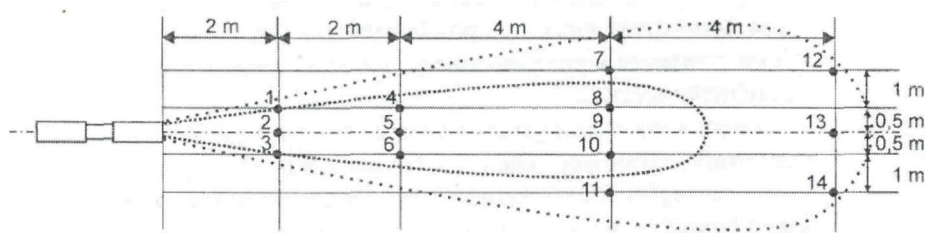
Использование модели турбулентности LES, используемой в популярном программном обеспечении FDS для анализа систем струйной вентиляции, является приемлемым при соблюдении надлежащей тщательности при подготовке пакетного файла и анализе результатов расчетов. Модель LES, в зависимости от принятого размера сетки, может пропускать вихри, оказывающие значительное воздействие на потоки воздуха вблизи выходного отверстия струйного вентилятора. Таким образом, анализ с использованием модели турбулентности LES должен сопровождаться апостериорно анализом правильности принятой числовой сетки (например, путем проверки так называемых неразрешенных масштабов энергии турбулентности - англ. *turbulence resolution*). Значение этого параметра не должно превышать 20% площади вблизи компонентов системы противопожарной вентиляции.

Пример командной строки для включения в пакетный файл программы FDS версии 6:

```
&SLCF PBZ=2.60, QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION'
```

Дополнительная информация об апостериорной проверке правильности принятого размера сетки содержится в разделе 16. 9.21 пособия для пользователей программы FDS [23].

Для повышения достоверности результатов численного анализа возможна их рабочая валидация. Такая валидация может заключаться в сравнении скорости потока воздуха, создаваемого вентилятором в выбранных точках измерения. Расположение точек измерения предложено на рисунке 18. Результаты измерений должны быть сопоставлены с результатами, полученными в сравнительном CFD анализе для физических моделей, граничных условий и размера конечного объема. В случае струйных реверсивных вентиляторов измерения должны быть повторены в отношении обоих направлений работы устройства.



m-m

Рис. 18. Примеры точек измерения скорости струйных вентиляторов для сравнительного анализа

В качестве критерия правильности решения принимается, что скорость на одной точке измерения не должна отличаться между измерениями и CFD анализом более чем на 20%, а сумма результатов измерений со всех точек не должна отличаться от измерений и CFD анализа более чем на 15%.

Альтернативным способом оценки точности численных расчетов является оценка ширины и длины потока воздуха при определенной скорости (0,5 м/с 1 м/с 2 м/с), а затем сравнение полученных результатов измерений и численного расчета, которые не должны отличаться друг от друга более чем на 15%.

### ***Модель переноса компонентов смеси***

Модель переноса компонентов смеси должна дать возможность оценить распространение дыма, понимаемого как частицы аэрозоля (сажи), плавающие в воздухе, а также измерить его массовую концентрацию.

Эта модель имеет особенно важное значение, так как на основе массовой концентрации дыма оценивается дальность видимости в дыму, который (или, в качестве альтернативы, массовая концентрация дыма) является наиболее часто оцениваемым параметром в CFD анализе. Дальность видимости в дыму, если говорить упрощенно, означает расстояние, с которого препятствие с определенными свойствами еще будет видимым, если предположить, что на всем расстоянии между ним и наблюдателем массовая концентрация дыма является одинаковой. Значение дальности видимости в дыму можно определить, зная массовую концентрацию дыма в каждом контрольном объеме [32].

$$S = \frac{K_1}{K_2 m_3}$$

где:

$K_1$  – постоянная со значением 3 для препятствий, отражающих дым, и 8 для светоизлучающих препятствий [29]

$K_2$  – коэффициент, значение которого для большинства горючих материалов  $7,8 \text{ м}^2/\text{г}$  [29]

$m_3$  – массовая концентрация дыма в данном конечном объеме ( $\text{г}/\text{м}^3$ ).

### **Модель очага пожара**

Очаг пожара должен быть смоделирован как объемный или поверхностный источник тепла и дыма, или как источник топлива, которое затем подлежит сжиганию согласно соответствующей модели. Мощность источника тепла и дыма должна быть изменяемой во времени.

Рекомендуемые кривые развития пожара для одного легкового автомобиля (в случае гаражей, оборудованных автоматическими водяными установками пожаротушения) и трех легковых автомобилей (в случае гаражей, не оборудованных автоматическими водяными установками пожаротушения), взятые из голландского стандарта NEN 6098: 2010 [12], показаны на рис.19 и 20.

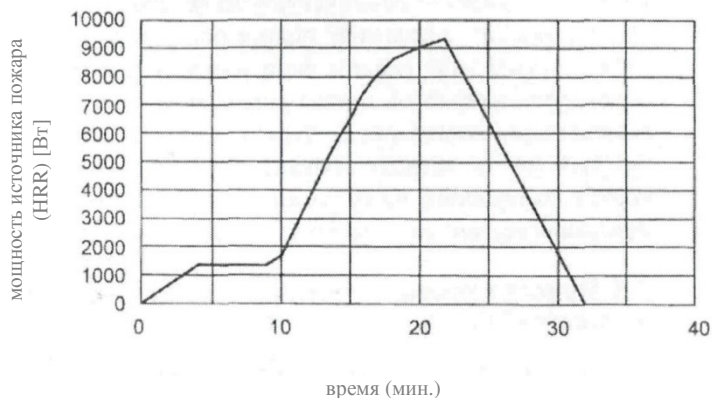


Рис. 19. Кривая развития пожара одного легкового автомобиля, принятая для CFD анализа [12]

Кривые, представленные на рисунках, были созданы в результате большой программы исследований развития пожара в закрытых гаражах, проведенных в /текст отсутствует/ году голландской организацией TNO [33]. Более подробная информация об изучении развития пожаров в гаражах содержится в [34] и [35].

Рекомендуемое значение коэффициента выхода сажи, т.н. *soot yield*, составляет  $Y_s = 0,1$  г/г. Принятие более низкого коэффициента сажи будет означать образование пропорционально меньшего количества дымообразующих продуктов горения (сажи) из того же количества сжигаемого материала, из-за чего результаты численных расчетов могут быть лучше, чем в случае принятия предложенного значения.

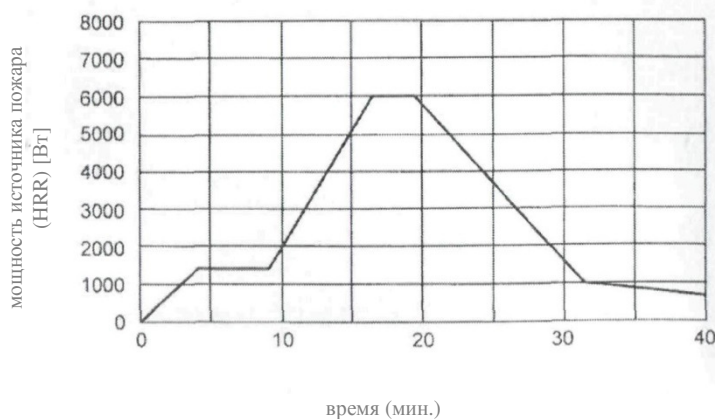


Рис. 20. Кривая развития пожара трех легковых автомобилей [12]

Рекомендуемое значение средней теплоты сгорания для легковых автомобилей составляет 25 МДж/кг. Принятие более высокого среднего значения теплоты сгорания будет означать образование пропорционально меньшего количества дымообразующих продуктов горения (сажи) из того же количества сжигаемого материала, из-за чего результаты численных расчетов могут быть лучше, чем в случае принятия предложенного значения.

Источник огня должен иметь площадь (объем), подобранную таким образом, чтобы максимальная мощность пожара на единицу площади (объема) не превышала  $625 \text{ кВт/м}^2$  ( $625 \text{ кВт/м}^3$ ). Изменение этого параметра приведет к изменению максимальной температуры дыма, образовавшегося в результате пожара.

#### **Прочие граничные условия, начальные условия и допущения, подлежащие анализу**

Физические и химические свойства материалов, из которых сделаны перегородки и элементы оборудования, должны соответствовать реальным. Значение коэффициента передачи тепла должно составлять  $8 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  для внутренних стен и  $25 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  для наружных стен.

Начальные условия моделирования должны соответствовать ситуации без каких-либо потоков или же могут быть результатом ранее проведенных расчетов системы бытовой вентиляции.

Продолжительность численных расчетов должна быть не короче, чем время, необходимое для достижения максимальной мощности огня в анализируемом сценарии. Время, установленное для прибытия пожарных и спасательных команд, или время начала спасательных операций и тушения пожара не должно быть основанием для ограничения продолжительности численных расчетов или максимальной мощности пожара. Вероятное время начала спасательных операций и тушения пожара довольно легко определить, но тут возможна большая погрешность. Это связано с возможностью возникновения непредвиденных ситуаций, не поддающихся контролю пожарной команды или администратора объекта, которые значительно увеличивают время начала операции (например, если гидранты загорожены припаркованным транспортным средством, дорожно-транспортное происшествие на пути следования спасательных команд, задержка в трансмиссии пожарной сигнализации). В то же время на действия, предпринятые пожарной бригадой, будет влиять оценка ситуации лицом, руководящим спасательными операциями, которую невозможно предсказать на стадии разработки численного анализа распространения дыма и тепла. Рекомендуемая продолжительность численных расчетов должна составлять от 20 до 30 минут, но не меньше, чем до достижения максимальной мощности пожара. Такой подход позволяет оценивать состояние окружающей среды в наиболее неблагоприятный момент развертывания спасательных операций.



## 7.5. Отчет о проведенном CFD анализе и представление результатов расчетов

Отчет о проведенном CFD анализе должен содержать, как минимум:

- описания:

- объекта с указанием пожарных отсеков гаража,
- системы противопожарной вентиляции с учетом сценариев действия системы, производительности и других параметров устройств, входящих в систему, а также четкую схему, показывающую распределение гаража на дымовые зоны и зоны обнаружения,
- сценариев развития пожара с учетом их расположения, размеров, кривой развития пожара, усредненной массовой теплоты сгорания и коэффициента выхода сажи,
- принятой численной модели вместе с физическими моделями, способа разделения модели с использованием числовой сетки и принятых упрощений;

- граничные условия и начальное моделирование;

- результаты выполненных численных расчетов для каждого сценария развития пожара;

- выводы на основе проведенного анализа, со ссылкой на принятые критерии оценки и их выполнение тестируемой системой.

Результаты расчетов должны быть представлены в виде рисунка или таблицы, принимая во внимание:

- проекции, показывающие распределение температуры, массовой концентрации дыма в отдельных моментах анализа - на высоте, соответствующей установленным критериям оценки системы,

- таблицы с предполагаемой максимальной температурой газов на элементах системы противопожарной вентиляции,

- проекции, показывающие распределение температуры и излучения на высоте 1,50 м в момент, когда пожар достигает максимальной мощности.

- проекции распределения других физических величин (например, скорости движения воздуха, концентрации продуктов горения и т.д.), имеющих отношение к оценке соответствия системы установленным критериям оценки.

Выводы анализа должны быть однозначными. Авторы моделирования должны подтвердить соответствие установленным критериям оценки либо указать методы или технические решения для достижения этого состояния.

Пример проекции численной модели закрытого гаража и результаты численных расчетов (скорость движения воздуха, температура и локальная дальность видимости знаков эвакуации) представлен на рисунках 21-24.

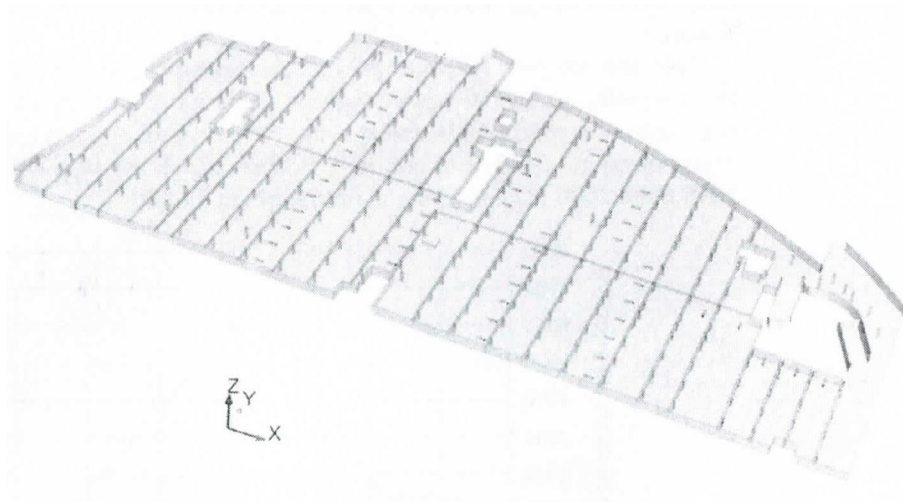


Рис. 21. Численная модель - пример закрытого гаража

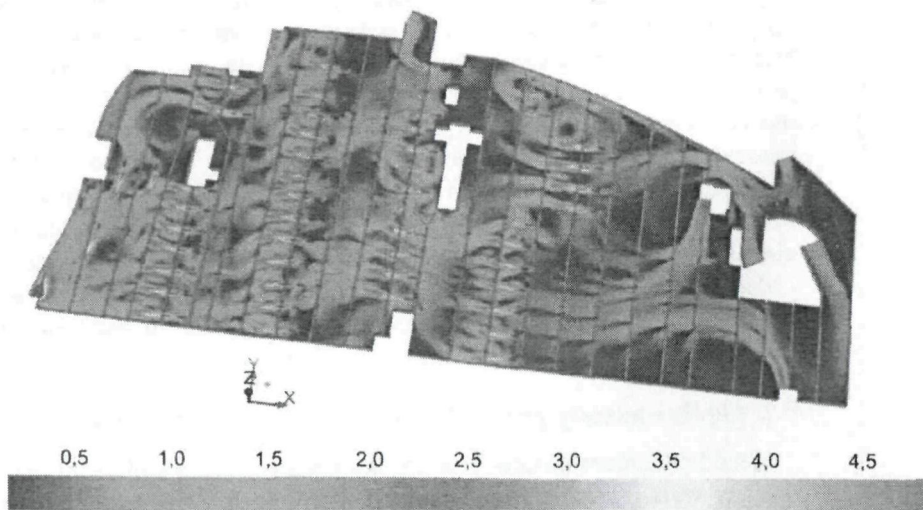


Рис. 22. Проекция, представляющая значение скорости движения воздуха в выбранной плоскости закрытого гаража

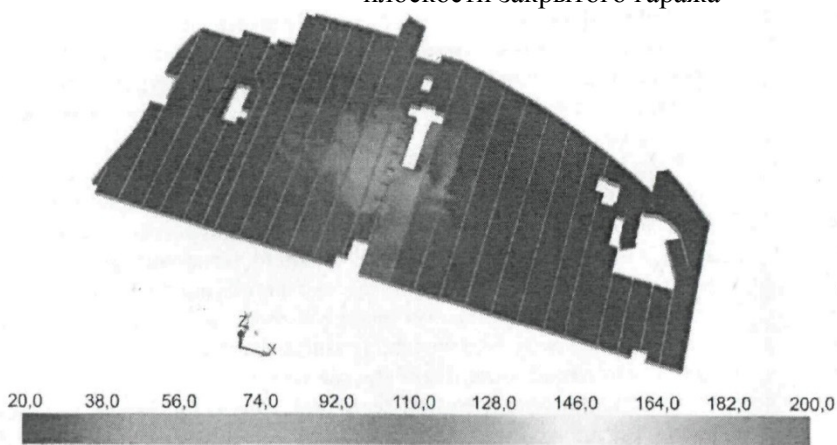


Рис. 23. Проекция, представляющая предполагаемую температуру дыма на высоте 2,00 м в момент достижения пожаром максимальной мощности

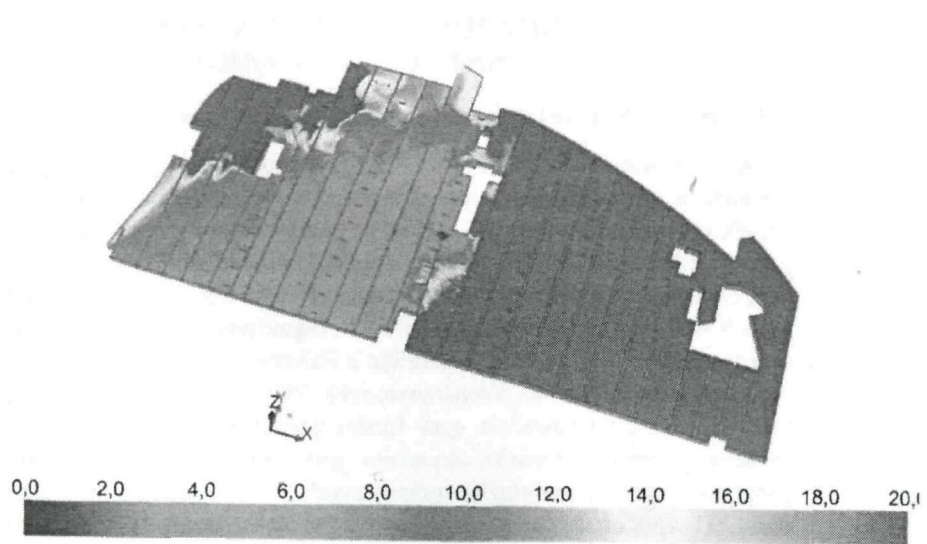


Рис. 24. Проекция, представляющая локальную дальность видимости знаков эвакуации, излучающих собственный свет, в момент достижения пожаром максимальной мощности. Видно, как дым задерживается на границе дымовых зон

## **8. ПУСК И ПРИЕМКА СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

### **8.1. Правовые основания приемки здания**

Исполнительные акты к Закону о строительстве [2] налагают на инвестора обязательство уведомить государственные органы, в том числе Государственную противопожарную службу (ГПС), о завершении возведения строительного объекта и намерении начать его использование. Объекты, которые требуют согласования с ГПС, перечислены в распоряжении [3]. Способ приемочных испытаний со стороны должностных лиц ГСП регулируется Законом о противопожарной защите [4] и Законом о Государственной противопожарной службе [5]. В ходе проверки ГПС оценивает, среди прочего, обеспечивают ли приборы, противопожарное и спасательное оборудование и огнетушащие средства эффективную защиту от пожара. Особое внимание уделяется оценке соответствия требованиям противопожарной защиты технических решений, используемых при строительстве зданий и сооружений, и соответствия их воплощения проекту строительства. Одним из многих вопросов, которые должны быть задокументированы во время приемки объекта ГПС, является, например, координация действия установки противопожарной вентиляции с другими системами противопожарной безопасности в здании.

Условием для разрешения использования противопожарного оборудования является проведение соответствующих проверок и испытаний, подтверждающих правильность его работы. Проверить срабатывание системы противопожарной вентиляции наряду с оценкой ее координации с другими установками противопожарной безопасности на объекте можно во время испытаний с горячим дымом. При такого рода испытаниях получают поток горячего воздуха и дыма, не вызывающий повреждения конструкций, оборудования дома или интерьера и отображающий пожар на объекте. Дым, распространяясь под потолком, активирует систему обнаружения пожара, а затем и все системы противопожарной безопасности, в соответствии со сценарием пожара для объекта. Во время испытания с применением горячего дыма оцениваются, в частности: удерживание двух слоев дыма в период времени, необходимый для эвакуации людей, способность системы обнаружить источник огня и удерживать дым в одной дымовой зоне. Во время тестовых испытаний измеряется время запуска и эффективность всех элементов системы вентиляции, а также оценивается взаимодействие системы с другими системами безопасности, расположенными в здании.

Следует отметить, что оценка эффективности системы носит качественный, а не количественный характер, поэтому большое влияние на ее результат оказывает опыт и знания лиц, ответственных за ее проведение. Ошибкой было бы полагать, что при стандартном испытании горячим дымом возможна однозначная оценка степени видимости или других параметров, связанных с задымленностью исследуемой зоны. Проверочный аэрозоль имеет иные оптические свойства, чем дым, возникающий при пожаре, кроме того, соотносить его массовую концентрацию в данном месте с массовой концентрацией дыма в реальном пожаре крайне сложно. В рекомендациях AS [18] и VDI [16] приведены существенные основания распространения результатов измерения при испытаниях на воздействие фактического пожара относительно температуры дыма, что, однако, в случае завершенных и принятых объектов не имеет большого практического значения. Метод, представленный в данной работе, позволяет в первую очередь оценить реагирование систем безопасности на объекте на возникшую угрозу и наблюдать за их взаимодействием. Эффективность системы и ее способность обеспечивать соответствующие условия окружающей среды во время пожара должны быть подтверждены на более ранней стадии проекта.

## 8.2. Общие правила проведения испытаний с горячим дымом

Перед тем как установка будет использоваться, необходимо провести ее приемку, подтверждающую, что система выполнена в соответствии с проектом и требованиями документов и стандартов, лежащих в основе проекта, эффективность ее работы и точность взаимодействия с другими системами противопожарной безопасности на объекте.

Приемочные испытания должны включать в себя запуск системы в каждом предполагаемом сценарии работы установки в каждой зоне обнаружения, проверку соответствия запуска компонентов системы принятому сценарию и проведение измерений скорости воздушного потока на отдельных компонентах системы.

Рекомендуемый метод проверки правильности выполнения, эффективности системы и ее взаимодействия с другими системами безопасности в здании – дымовые испытания с использованием горячего дыма. Испытание с горячим дымом состоит в создании потока горячего воздуха при помощи источника тепла высокой мощности и введении в него индикаторного газа, позволяющего проиллюстрировать поток дыма в исследуемом пространстве. Во время испытания с горячим дымом система должна работать в автоматическом режиме, в том числе это касается автоматического обнаружения пожара [30].

Набор для проведения испытаний с горячим дымом состоит из лотков с топливом, которое является источником тепла, генераторов проверочного аэрозоля, устойчивого к воздействию высоких температур, источников питания и рабочего газа, а также измерительного оборудования, используемого для проверки параметров элементов системы вентиляции. Пример набора для генерации горячего дыма показан на рисунке 25.

Тесты с использованием горячего дыма должны производиться в репрезентативных местах в каждой дымовой зоне здания. Если для данной дымовой зоны был проведен CFD анализ, расположение источника тепла и дыма при испытании с горячим дымом должно совпадать с местоположением источника в моделировании (фото б). Результаты испытаний должны быть сопоставлены с результатами моделирования, но с учетом различной мощности пожара в испытаниях с горячим дымом и проведенных CFD анализах не представляется возможным непосредственно сравнить результаты обоих экспериментов. Тем не менее, это сравнение может включать в себя, например, определение областей, в которых дым смешивается с поступающим компенсационным воздухом, или сравнение скорости потока воздуха, вызванного действием системы.

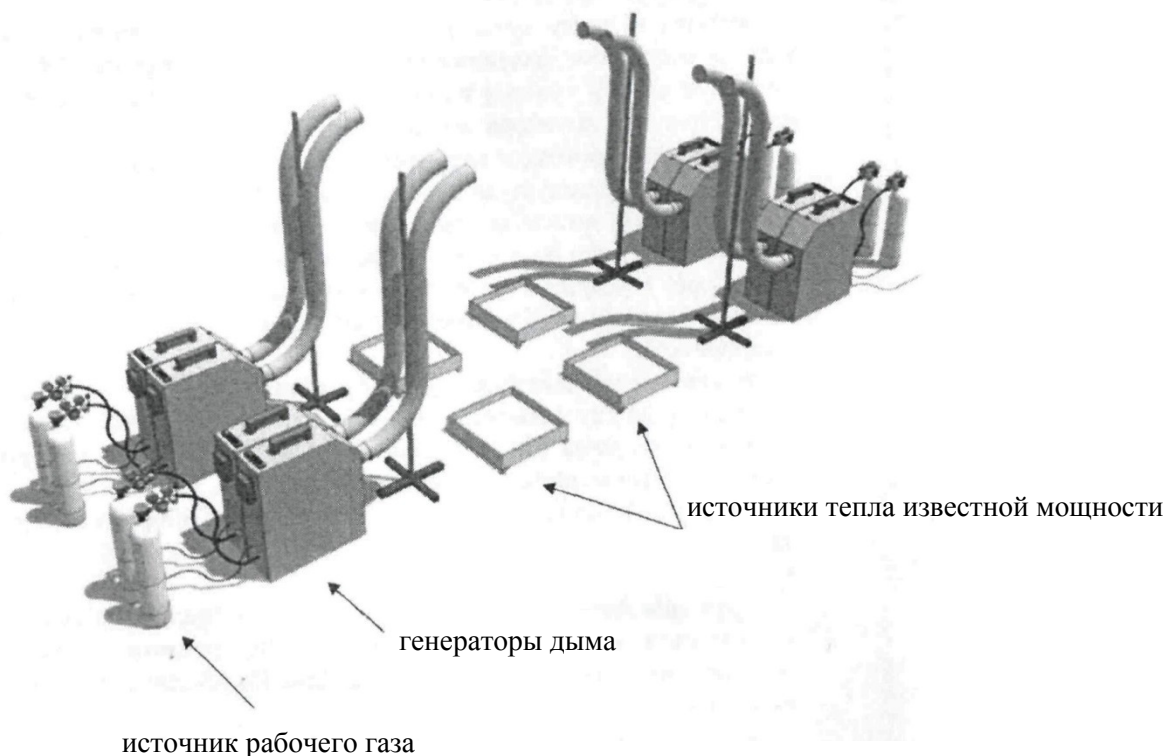


Рис. 25. Пример комплекта оборудования, используемого во время испытаний с горячим дымом

Перед тем как начать тестовую программу с горячим дымом, анализируется документация системы противопожарной вентиляции и сценарий развития событий во время пожара. Прежде чем приступить к испытаниям, проверяются протоколы регулирования установки при помощи измерений скорости потока и производительности отдельных компонентов системы.

Значения, измеренные в ходе испытания, не должны отличаться от принятых в проекте и в проведенных CFD анализах более чем на 10%. Время запуска отдельных компонентов системы не должно отличаться более чем на 30 секунд от значений, представленных в проекте, при этом недопустимо изменение очередности запуска оборудования относительно указанной в проекте.



Фото 6. Испытание с горячим дымом в закрытом гараже

Непосредственно перед началом испытаний с горячим дымом следует запустить систему бытовой вентиляции, известить администратора объекта и ГПС, а также убедиться, что в помещениях машинного отделения противопожарной вентиляции или в воздуховодах нет людей. Началом испытания считается момент зажигания первого лотка с топливом.

Мощность тестового пожара, используемого в испытании с горячим дымом, должна быть не менее 300 кВт для гаражей, оборудованных стационарными водяными установками пожаротушения, и не менее 450 кВт для остальных гаражей. Для гаражей высотой более 3,20 м рекомендуется увеличить мощность пожара, чтобы достичь более высокой температуры дымового слоя, растекающегося под потолком. Увеличение мощности, генерируемой при испытании с горячим дымом, приближает тест к реальному пожару, за счет повышения риска повреждения оборудования или элементов отделки объекта. Не следует забывать о защите спринклерной установки, чтобы в процессе испытания не случилось внезапного вытекания воды. Испытание с горячим дымом с мощностью источника пожара около 1,00 МВт показано на фотографии 7.

Во время отдельных тестов с горячим дымом необходимо проверить, не повлияет ли проникновение дыма в соседнюю дымовую зону или запуск ручного пожарного извещателя на работу системы.



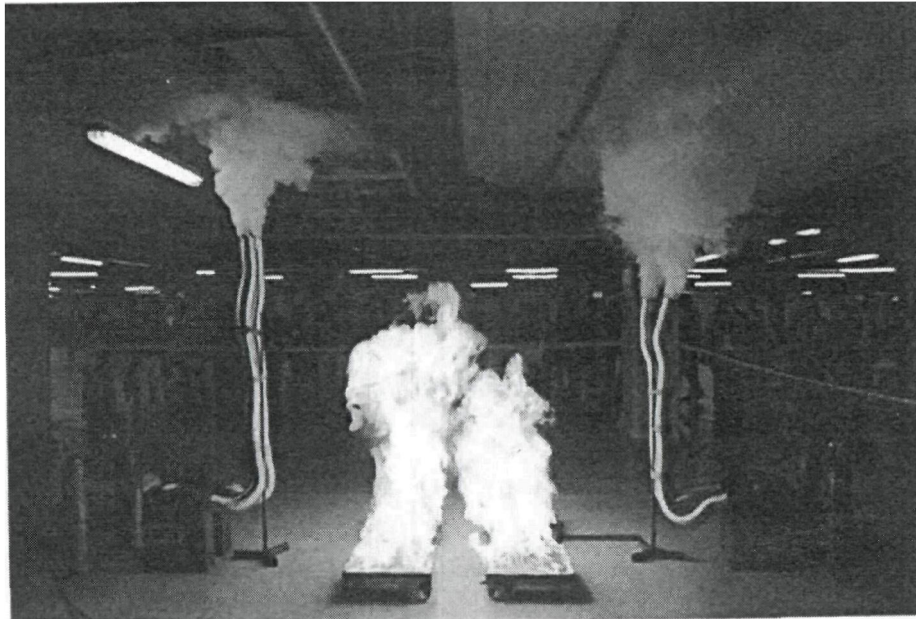


Фото 7. Испытание с горячим дымом, мощность источника пожара около 1,00 МВт

Индикаторный газ, который вводят в конвекционную колонну дыма, должен быть устойчивым к воздействию высоких температур и давать возможность легко наблюдать за его распространением в пространстве гаража в течение всего времени испытания с горячим дымом.

Мощность тестового пожара должна быть известна лицам, проводящим испытание, поскольку ее значение важно для правильной оценки результатов испытания. Поэтому допускается использование источников тепла, описанных в литературе, или своих собственных с известными характеристиками.

Дополнительная информация о выборе источников тепла и дыма, а также данные для оценки температуры под потолком испытываемого пространства содержатся в рекомендациях AS 4391-1999 [18].

### 8.3. Элементы, оцениваемые в ходе испытания

В ходе испытаний с использованием горячего дыма следует проводить оценку правильности запуска отдельных элементов системы противопожарной вентиляции, в частности, оценку работы струйных вентиляторов, а также измерения производительности точек притока и вытяжки, скорости поступления компенсационного воздуха. Должно регистрироваться время обнаружения пожара и начала работы отдельных компонентов системы противопожарной вентиляции.

В контрольный перечень элементов, активация которых проверяется во время испытания с горячим дымом, должны входить, по меньшей мере:

- задержка работы системы бытовой вентиляции, остановка эскалаторов и движущихся тротуаров, работа лифтов в пожарном режиме (или спуск и остановка в открытом положении на уровне 0), а также выполнение других действий по управлению системами здания, содержащихся в сценарии пожара,
- пуск систем защиты от задымления и предотвращение задымления эвакуационных лестничных клеток,
- регулировка всех устройств противопожарной безопасности, предусмотренных в сценарии пожара для испытываемого пожарного отсека,
- соответствие производительности вытяжных, приточных и струйных вентиляторов значениям из проекта противопожарной вентиляции,
- проверка:
  - соответствует ли время запуска системы противопожарной вентиляции запланированному, и верна ли последовательность запуска отдельных элементов системы (например, закрытие противопожарных клапанов происходит перед запуском вытяжных вентиляторов),
  - не приводит ли поступление компенсационного воздуха к его смешиванию с дымом,
- оценка:

- удержания двух слоев дыма в период времени, необходимый для эвакуации людей из здания, а в случае систем противопожарной вентиляции со струйными вентиляторами оценивается, не был ли запуск этих вентиляторов преждевременным,
- соответствия направления потока воздуха направлениям, установленным путем численных расчетов с использованием метода CFD,
- перетекания дыма в соседние дымовые зоны или пожарные отсеки,
- влияния срабатывания пожарной сигнализации в другой зоне здания (путем запуска ручной пожарной сигнализации) на системы противопожарной безопасности в испытываемой области,
  - переход системы противопожарной безопасности на резервный источник питания после запуска главного выключателя электропитания,
  - передача информации об обнаружении пожара на контрольный пункт Государственной противопожарной службы.

#### **8.4. Критерии оценки**

Критериями эффективности системы противопожарной вентиляции, которые можно оценить в испытаниях с горячим дымом, являются:

- удержание дыма в подпотолочном слое в течение времени, необходимого для эвакуации людей,
- отсутствие смешивания компенсационного воздуха с дымом,
- ограничение распространения дыма в район зоны обнаружения/дымовой зоны, в которой проводится испытание, а в случае систем контроля распространения дыма и тепла - доступ к источнику пожара,
  - запуск всех компонентов системы автоматически, в очередности, предусмотренной в проекте системы, без задержек,
  - в случае систем контроля распространения дыма и тепла – доступен ли источник огня с расстояния не более 15 м,
  - отсутствие влияния обнаружения дыма или использования кнопки ручного пожарного извещателя в другой дымовой зоне (или пожарном отсеке), нежели испытываемая, на реализацию сценария для зоны, в которой был обнаружен пожар.

#### **8.5. Документация для испытаний с горячим дымом**

После каждой серии испытаний, проведенных с горячим дымом, необходимо составить отчет, в котором должны содержаться, по меньшей мере:

- описание здания с комплексным описанием системы противопожарной вентиляции и сценариев ее работы,
  - сценарии проведения испытаний с горячим дымом, вместе с подробным описанием источника пожара и последовательностью задействования его составных элементов,
  - информация о местоположении источника тепла и дыма, условиях окружающей среды внутри и снаружи здания, дата и время начала и окончания испытания,
  - заполненный бланк с подтверждением исправной работы или с указанием некорректности работы всех оцениваемых элементов противопожарной автоматики, с указанием времени приведения в действие отдельных элементов,
    - оценка соответствия критериям эффективного срабатывания,
    - результаты измерений вместе со сравнением полученных значений со значениями, представленными в протоколе регулирования системы, и допущениями проекта системы противопожарной вентиляции гаража,
    - фотодокументация или аудиовизуальные записи проведенного испытания.

#### **8.6. Безопасность во время проведения испытаний с горячим дымом**

Испытания с использованием горячего дыма имитируют опасное явление, каковым является пожар, и сами также несут в себе определенный риск. Правильный подбор источника тепла и дыма для здания позволяет свести к минимуму опасность повреждения конструкций или элементов отделки внутренней части здания, но не исключает полностью угрозы для людей, находящихся в зоне испытания огневого воздействия. В помещении, в котором проводятся испытания с горячим дымом, должны находиться только лица, ответственные за их проведение и, возможно, представители инвестора, проектировщика или исполнителя систем. Эти лица должны быть информированы о планируемом ходе испытания и об опасности, которой они могут подвергаться. Проведение каких-



либо строительных или отделочных работ во время испытаний с горячим дымом может представлять непосредственную угрозу жизни или здоровью вследствие быстро меняющихся условий окружающей среды во время испытания (в частности, резкого уменьшения видимости).

Источником тепла в испытаниях является открытый огонь, в обращении с которым необходима крайняя осторожность. Вблизи источника тепла не могут находиться никакие горючие материалы. В зажженный или раскаленный лоток никогда не следует добавлять топливо. Все установки, которые могут находиться в зоне действия высоких температур (в частности, спринклерные системы), должны быть защищены негорючими и изолирующими материалами.

Используемый в испытаниях дым не токсичен и не загрязняет, а его температура на высоте свыше 2,50 м, не должна превышать 40° С. Полученный аэрозоль имеет оптические свойства, аналогичные свойствам дыма, в частности, большой коэффициент рассеяния света. В ходе испытаний с горячим дымом возможна ситуация, при которой дальность видимости строительных перегородок падает почти до нуля. В таких условиях следует соблюдать крайнюю осторожность при движении по зданию.

Источником угрозы для людей, участвующих в испытаниях с горячим дымом, также могут быть элементы испытываемых систем противопожарной вентиляции. Очень большая скорость движения воздуха в непосредственной близости от вытяжных или приточных решеток и в помещениях машинного отделения противопожарной вентиляции может быть опасной для людей, находящихся вблизи от них. Перед началом испытаний с горячим дымом следует убедиться, что в вышеупомянутых местах нет людей. Если система противопожарной вентиляции работает таким образом, что может представлять угрозу для людей, находящихся в исследуемой зоне, испытание необходимо немедленно остановить, а систему выключить. Особенно опасной ситуацией, при возникновении которой следует немедленно прекратить испытания, является открытие или закрытие клапанов на элементах противопожарной системы во время работы вентиляторов (изменение выполнения сценария пожара во время проведения испытания).