

ЗАЩИТА ПРОЕМОВ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ. ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

В. Г. Булыгин, генеральный директор АО «НПО «Тепломаш»

Д. В. Голубев, главный инженер АО «НПО «Тепломаш»

Ю. Н. Марр, советник генерального директора



ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ БУЛЫГИН
Кандидат технических наук, генеральный директор АО «НПО «Тепломаш», специалист в области тепломассообмена и прикладной гидроаэродинамики. В 1976 году окончил энергомашиностроительный факультет Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина. В 1982 году защитил кандидатскую диссертацию. С 1976 года по 1990 год работал в ЛенНИИхиммаше на инженерных и научных должностях. С 1993 года работает в АО «НПО «Тепломаш». Автор более 20 научных трудов и 9 изобретений. Разработки В. Г. Булыгина реализованы в продукции АО «НПО «Тепломаш», в частности, в конструкциях и дизайне воздушно-тепловых завес.

Различные аспекты защиты воздушными завесами проемов больших размеров (самолетных ангаров, авиа- и судостроительных заводов, помещений для спецтехники) обсуждались в [1-3]. Проблемы, возникающие в таких случаях, не имеют простых решений, а, главное, предлагаемые решения зачастую носят спорный характер. В данной статье предпринята попытка снизить градус дискусионности, опираясь на современные технологические возможности в решениях существующих проблем.

1. Главная сложность в организации защиты больших проемов состоит в неразрывной связи двух обстоятельств: непомерно больших тепловых затрат, исчисляемых мегаваттами (часто десятками мегаватт) и крайне редким и коротким открыванием ворот (один-два раза в сутки по 20 минут). Это приводит к чудовищным пиковым нагрузкам на энергоснабжение в период открытия ворот. Уровень энергозатрат при экстремальных зачастую условиях определяется допустимым понижением внутренней температуры величиной +5 °С в течение всего периода открытия ворот. При таких требованиях система частичной аэродинамической защиты (САЗ — подача воздуха системой компактных струй из глубины помещения к проему) совместно с последующим «натопом» [4] задачу не решают. Численное моделирование ситуации показало [4], что до момента включения «натоп» температура воздуха в помещении опускается ниже — 20 °С, температура в рабочей зоне удерживается на уровне -6-7 °С в течение всего периода открытых ворот.

Поэтому в [2] для удержания внутренней температуры

на уровне +5 °С было предложено решение, включающее следующие составляющие:

- Проем защищают мощные верхние завесы, ненагретые струи которых буквально «отсекают» затекание наружного воздуха внутрь, реализуется полная защита герметичного помещения ангара, параметр защиты $q = 1$.

- В связи с быстрым выхолаживанием помещения, обусловленным, во-первых, теплопотерями струй, контактирующих с наружным воздухом, и, во-вторых, возникающей от действия завес интенсивной рециркуляцией воздушных масс в пространстве ангара, включаются мощные водяные теплогенераторы. Их нагретые воздушные струи направлены из верхней части ангара вниз для перемешивания охлажденного потока от струй завес и повышения температуры смеси.

- Высокая тепловая мощность теплогенераторов обеспечивается интенсивной подачей нагретой воды из теплоаккумулятора, разрядка которого рассчитана на продолжительность открытия ворот, а зарядка протекает в течение длительного периода между двумя последовательными

открываниями ворот, тепловая мощность зарядки при этом сопоставима с мощностью стандартного отопления ангара.

Этим обеспечивается раздельная аэродинамическая и тепловая защита проема, приносящая экономию до 50% тепловой мощности. Этим же формируется темп понижения температуры в ангаре до проектной величины +5 °С к моменту закрывания ворот и полной разрядки аккумулятора.

Принципиально реализуемое решение создания пиковой тепловой «атаки» в период открытых ворот имеет достаточно высокую цену. Во-первых, вся система подачи и отведения горячей воды для пиковой нагрузки как

внутри ангара, так и снаружи должна быть выполнена из труб относительно большого диаметра. Во-вторых, установка вблизи ангара водяного теплоаккумулятора совместно с насосной станцией высокой производительности требует организации специального теплового пункта дополнительно к стандартному тепловому пункту для обычного теплоснабжения ангара [5]. Кроме того, для обустройства и эксплуатации баков-аккумуляторов необходимо соблюдение специальных мер безопасности.

2. Этим не ограничиваются проблемы, сопряженные с предложенным решением. В действительности, несмотря на удержание



ДАНИИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ГОЛУБЕВ
 Главный инженер АО «НПО «Тепломаш». С 2001 года работал на НПО «Тепломаш» слесарем-сборщиком, начальником испытательной лаборатории. В 2016 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Автор шести изобретений.

Таблица 1. Расчетные параметры защиты ангаров

Размеры проема	H*B	м	12 x 36	22 x 70
Температуры воздуха: наружного внутреннего	t_1	°С	-32	-32
	t_2		+16	+16
Продолжительность периода открытого проема	$\tau_{откр}$	мин.	10	20
Модель завесы			КЭВ-П10010А	
Количество модулей	N		25 в один ряд	49 в одном ряду, рядов 3
Ширина сопла	b_3	м	0,70	$0,70 \times 3 = 2,1$
Скорость струи в сопле	v_3	м/с	15,6	15,6
Расход воздуха модуля	V_3	м³/час	55 000	55 000
Угол струи к проему	α	град.	25	30
Коэффициент эжекции	λ		2,55	2,05
Теплопотери	$\langle Q_{пот} \rangle$		0,290	0,232
Температура смеси	$t_{см}$	°С	8,2	8,7
Тепловая мощность компенсации	$Q_{комп}$	кВт	6520	31 660
Период циркуляции воздушных масс	$\tau_{цирк}$	с	61	73
Температура наружной эжекции	$t_{э/н}$	°С	-14	-10,8
Высота слоя смеси	$h_{см}$	м	3,2	6,6
Высота слоя эжекции	$h_{э/н}$	м	1,38	2,26
Высота слоя a_1	a_1	м	1,15	2,7
Высота слоя a_2	a_2	м	0,8	2,0
Высота слоя a_3	a_3	м	0,3	1,0



ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ МАРР
 Кандидат технических наук,
 старший научный сотрудник,
 советник генерального
 директора АО «Тепломаш»
 по научно-техническим вопросам,
 специалист в области теплообмена
 и прикладной гидроаэродинамики.
 В 1963 году окончил
 энергомашиностроительный
 факультет Ленинградского
 политехнического института
 имени М. И. Калинина.
 В 1969 году защитил кандидатскую
 диссертацию. С 1963 по 1990 год
 работал в ЛенНИИХиммаше
 на научных должностях.
 С 1999 года работает
 в АО «Тепломаш». Автор более
 чем 60 научных трудов, в том
 числе 2 книг и 26 изобретений.
 Разработки Ю. Н. Марра последних
 лет реализованы в продукции
 АО «Тепломаш».

температуры смеси не ниже + 5 °С, в помещении неизбежно появятся локальные очаги с более низкой и даже отрицательной температурой. Дело в том, что температура смеси $t_{см}$ есть средняя (среднемассовая) температура втекающего от проема потока

$$t_{см} = t_2 - \langle Q_{пот} \rangle (t_2 - t_1) / 0,5(\lambda + 1), \quad (1)$$

где $\langle Q_{пот} \rangle$ — относительные потери теплоты струями завес при их контакте с наружным воздухом; λ — коэффициент эжекции плоской струи; t_1 и t_2 — наружная и внутренняя температуры. Здесь и далее использованы расчетные формулы шиберующей защиты верхней завесой по [6]. В верхней части потока смеси температура близка к внутренней температуре помещения. В нижней части вдоль пола температура будет определяться наружной частью ядра постоянного расхода перед отделением от струи эжектированных

снаружи масс. Эта температура будет порядка среднемассовой температуры отделившихся от струи и ушедших на улицу масс. Ее определение не составит труда, поскольку известен расход наружной эжекции перед отделением $G_{э/н} = 0,5(\lambda - 1) G_3$ и тепловой поток, поступающий от ядра постоянного расхода в эжектированные массы (тепловые потери). Отсюда среднемассовая температура наружной эжекции будет

$$t_{э/н} = t_1 + \langle Q_{пот} \rangle (t_2 - t_1) / 0,5(\lambda - 1). \quad (2)$$

Для нахождения промежуточных значений температурного профиля между средними $t_{э/н}$ и $t_{см}$ необходимо определить толщины слоев по среднемассовым скоростям:

- толщина слоя смеси $h_{см} = G_{см} / (\rho_{см} v_{см} B_{пр})$ или после преобразований

$$h_{см} / b_3 = 0,5\lambda(\lambda + 1)(\rho_3 / \rho_{см}), \quad (3)$$

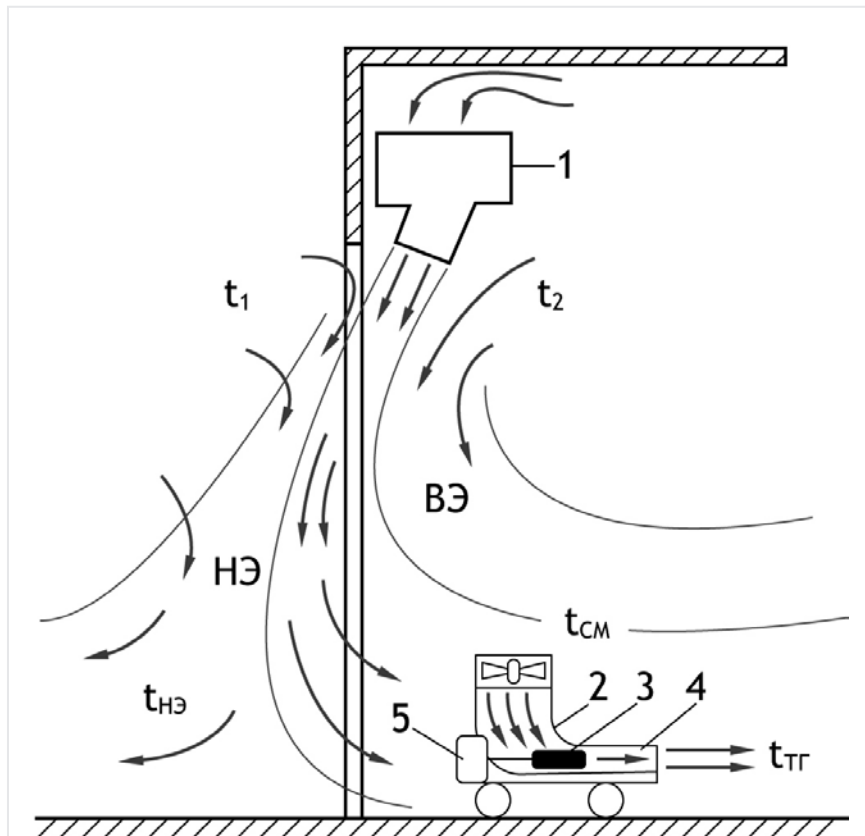


Рис. 1. Схема работы мобильного теплогенератора в проеме ангара

1 - завеса, 2 - теплогенератор, 3 - газовая горелка,
 4 - воздушное сопло, 5 - газовый баллон,
 НЭ - наружная эжекция, ВЭ - внутренняя эжекция

- толщина слоя наружной эжекции

$$h_{э/н}/b_3 = 0,5\lambda(\lambda - 1)(\rho_3/\rho_{э/н}). \quad (4)$$

Поскольку все толщины пропорциональны соответствующим расходам, то, опираясь на заданные t_1 и t_2 и на средние $t_{э/н}$ и $t_{см}$, можно построить в координатах $h-t$ из отрезков прямых профиль температуры, по которому найдутся приближенно высоты слоев от пола с температурами ниже $t_{см}$ (слой a_1), ниже $+5\text{ }^\circ\text{C}$ (слой a_2) и ниже нуля (слой a_3). Опуская трудоемкие вычисления, приведем основные результаты для защиты двух ангарах (см. табл. 1).

Уже на первой циркуляции с открытия ворот в помещение вдоль пола затекают достаточно толстые слои воздуха с температурой ниже $+5\text{ }^\circ\text{C}$ и отрицательной температурой. Понятно, что движущиеся над ними более теплые слои значительно легче втягиваются в глобальную циркуляцию и уходят на всасывание в завесу, тогда как холодные накапливаются вдоль пола. Это до некоторой степени перечеркивает усилия по удержанию среднemasсовой температуры на уровне не ниже $+5\text{ }^\circ\text{C}$, если в процессе защиты проема

не предпринимается интенсивного перемешивания втекающего потока смеси.

3. Как было сказано, при всей рациональности тепловой компенсации подачей в теплогенераторы горячей воды из аккумулятора возникают проблемы с организацией специальных тепловых пунктов и трудно устранимым накоплением холодного (ниже нуля) воздуха вдоль пола ангара.

Альтернативой такому способу компенсации могут служить газовые теплогенераторы прямого нагрева (без теплообменников) в виде автономных управляемых мобильных устройств (рис. 1). К моменту начала открытия ворот и работы завесы 1 теплогенераторы 2 по заданной программе подъезжают изнутри к воротам и располагаются в размеченных местах, не препятствуя проходу самолетов или вертолетов (рис. 2, возможны и другие программы движения теплогенераторов относительно самолетов). Теплогенераторы имеют вентилятор с электроприводом и соплом 4, формирующим и направляющим струю, и горелку 3, в которой сгорающий газ отдает теплоту вместе с продуктами сгорания воздушной струе. Теплогенераторы снабжены газовым

баллоном 5, рассчитанным на работу в течение периода открытых ворот, и электроаккумулятором, обеспечивающим перемещение теплогенератора и привод вентилятора. После закрытия ворот теплогенераторы уезжают в помещение обслуживания, где происходит зарядка электроаккумуляторов и замена газовых баллонов.

Вентиляторы всасывают воздух подтекающей сверху защитной струи завес, имеющей температуру смеси. Сопло теплогенератора направляет нагретый до температуры $t_{тр}$ воздух в сторону пола под заворачивающую в помещение струю завесы, в те места, где накапливаются слои с температурой ниже нуля и ниже температуры смеси. Таким образом осуществляется перемешивание холодных слоев воздуха с нагретыми струями и общее перемешивание смеси, оттекающей от проема, с внесением в нее теплоты компенсации. Воздушный баланс помещения сохраняется.

4. Рассмотрим сжигание газа в прямом нагреве и поступление продуктов сгорания в помещение ангара. Учитывая, что температура смеси в обоих вариантах лишь на три градуса превышает допустимую, примем за основу тепловую мощность компенсации

Таблица 2. Результаты расчета сжигания пропана

Размеры проема	H*В	м	12 x 36	22 x 70
Объем помещения	Ω	м ³	40 000	250 000
Тепловая мощность компенсации	Q _{комп}	кВт	6520	31 660
Продолжительность периода открытого проема	τ _{откр}	мин.	10	20
Суммарная теплота компенсации	Q _{комп} × τ _{откр}	кДж	3,9×10 ⁶	37,9×10 ⁶
Объем и масса *) сжигаемого пропана	V _{проп} m _{проп}	м ³	41,8	406,7
		кг	80,0	773,0
Количество баллонов пропана	По 27 л По 50 л	шт.	7	67
		шт.	4	34
Объем жидкой фазы пропана*	V _{проп(жф)}	л	160,0	1520,0
Объем воздуха для сжигания пропана	V _{возд}	м ³	995,0	9680,0
Доля сожженного воздуха в объеме помещения	V _{возд} /Ω 100%	%	2,5	3,9
Объем продуктов сгорания	V _{прод/сг}	м ³	1078,0	10 429,0
Объем и масса диоксида углерода в продуктах сгорания	V _{со2} m _{со2}	м ³	125,4	1220,0
		кг	248,0	2416,0
Плотность диоксида углерода в воздухе ангара в конце сжигания	m _{со2} /Ω	мг/м ³	6200 Меньше ПДК = 9000 мг/м ³	9664 На 7% больше ПДК
Доля продуктов сгорания в объеме помещения	V _{прод/сг} /Ω 100%	%	2,7	4,2

* При температуре 15 °С.

Таблица 3. Параметры теплогенераторов

Размеры проема	H*В	м	12 x 36	22 x 70
Тепловая мощность компенсации	$Q_{\text{комп}}$	кВт	6520	31 660
Продолжительность периода открытого проема	$\tau_{\text{откр}}$	мин.	10	20
Расход смеси воздуха от завесы	$G_{\text{см}}$	кг/час	$119100 \times 25 = 2,98 \times 10^6$	$317 050 \times 49 = 15,5 \times 10^6$
Тип вентилятора			ВО-10	ВО-12,5
Расход воздуха теплогенератора	$V_{\text{во}}$	м ³ /час	35 000	65 000
Мощность горелки при подогреве на Δt	$N_{\text{г}}$	кВт	500 $\Delta t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	1150 $\Delta t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Количество теплогенераторов	z	шт.	13	28
Длина по размаху обслуживания теплогенератором	B/z	м	$36/13 = 2,8$	$70/28 = 2,5$
Мощность вентилятора	$N_{\text{во}}$	кВт	3,0	7,5
Частота вращения		об/мин	950	950
Размеры сопла		м	0,5 x 2,0 при скорости 10 м/с	0,6 x 2,0 при скорости 15 м/с

по табл. 1 (включив сюда некоторый запас). Низшая теплота сгорания пропана 93 180 кДж/м³, при этом для сжигания 1 м³ пропана требуется 23,8 м³ воздуха и образуется 25,8 м³ продуктов сгорания (в том числе 3 м³ диоксида углерода). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что плотность диоксида углерода в самом конце периода открытых ворот и процесса сжигания пропана в первом случае не превышает ПДК, а во втором превышает ПДК на 7%, что можно будет откорректировать при организации тепловой компенсации.

5. Предложение использования для тепловой компенсации газовых теплогенераторов прямого нагрева в виде автономных мобильных устройств не является фантастикой. Во-первых, оценки табл. 2 свидетельствуют о реалистичности и безопасности прямого сжигания газа в атмосфере ангара. Во-вторых, в той же табл. 2 показано, что существующие стандартные баллоны для пропана полностью удовлетворяют потребности в тепловой энергии компенсации практически на любое реальное время открытия ворот даже очень большого размера. В-третьих,

современный уровень техники позволяет использовать электроаккумуляторы не только для перемещения теплогенератора, но и для обеспечения работы вентилятора в период открытых ворот. И, в-четвертых, нет проблем с программным обеспечением управления перемещением теплогенераторов по ангару и расстановкой их в обозначенных местах (достаточно вспомнить управление беспилотников).

Покажем возможность реализации теплогенераторов на основе стандартных осевых вентиляторов. В табл. 3 представлены варианты компоновки теплогенераторов для двух рассмотренных случаев.

Среди разнообразия отечественных горелок, предназначенных преимущественно для сжигания природного газа, имеется горелка «Вихрь» фирмы ООО «Волгатерм» [7], способная в соответствующей модификации работать на любом газе с теплотой сгорания выше 9600 кДж/м³. Диапазон мощностей — от 110 кВт до 3,5 МВт.

Важным моментом в устройстве теплогенератора является его высота от пола, которая определяется минимальной высотой крыла самолета от пола (от земли). К сожалению, в габаритных характеристиках различных типов самолетов этот размер отсутствует. Косвенно

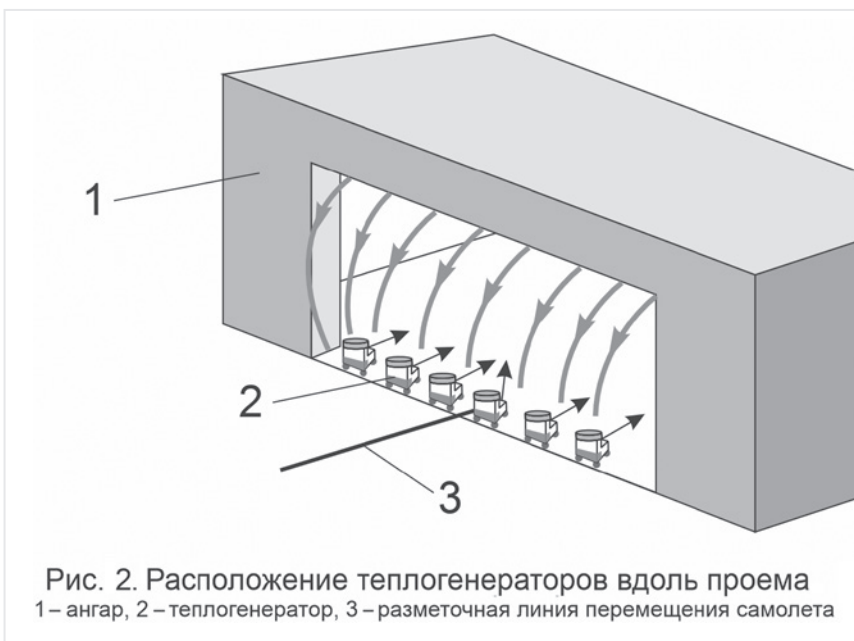


Рис. 2. Расположение теплогенераторов вдоль проема
1 – ангар, 2 – теплогенератор, 3 – разметочная линия перемещения самолета



можно оценить его по расстоянию от земли до двигателя под крылом, которое лежит в диапазоне 0,42–0,57 м. Исходя из этого, минимальная высота до крыла составляет около 1,5 м. Для того, чтобы самолет мог без касания крыльями проезжать над расставленными по размаху пролета теплогенераторами, их конфигурация должна иметь приплюснутую и вытянутую перпендикулярно пролету форму. Однако, как было замечено, возможны разные варианты организации перемещения теплогенераторов относительно выкатываемого или выкатываемого самолета. Поэтому размер по вертикали теплогенератора можно не связывать с расстоянием от крыла до земли. В рамках этой статьи не имеет смысла детально прорабатывать конструкцию теплогенератора. Представляется достаточно обозначить реальность составных частей проекта.

6. Таким образом, современные технологические возможности позволяют существенно упростить осуществление огромной и кратковременной пиковой

тепловой нагрузки при защите больших проемов самолетных ангаров. Отпадает необходимость в сооружении специального теплового пункта с водяными теплоаккумуляторами, мощной насосной станцией, соблюдением особых мер безопасности. Исключается монтаж водяных воздухоподогревателей верхнего расположения и дорогостоящая разводка по ангару водяных труб большого диаметра, а также необходимость усложненного эксплуатационного обслуживания оборудования.

Вместе с этим относительно просто решается проблема эффективного смесительного привнесения компенсационной теплоты в воздушные потоки с реальным удержанием температуры воздуха в рабочей зоне, примыкающей к полу, на уровне не ниже + 5 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марр Ю. Н. Защита проемов больших размеров. Проблемы и решения // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. № 2, 2015.

2. Булыгин В. Г., Марр Ю. Н. Защита завесами проемов больших размеров. Проблемы и решения. Часть вторая // Инженерные системы. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2016, № 3. С. 18–22.

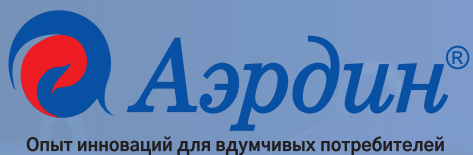
3. Булыгин В. Г., Марр Ю. Н. Защита завесами проемов больших размеров. Проблемы и решения. Часть третья // Инженерные системы. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2017, № 1. С. 16–22.

4. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Крупкин Г. Я., Стронгин А. С., Шилькрот Е. О. Отопление и вентиляция производственных помещений. Издательство «АВОК. Северо-Запад». Санкт-Петербург. 2007. 400 с.

5. СП 510.1325800.2022. Свод правил. Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения.

6. Марр Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы, расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб.: АО «НПО «Тепломаш», 2017. — 160 с.

7. Каталог ООО «Волгатерм». [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://volgatherm.ru/katalog/volgaterm/> (дата обращения: 21.12.2023).



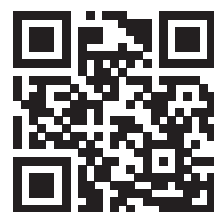
+7 (495) 968-24-04

info@aerdyn.ru

Отечественный производитель вентиляционного оборудования

- Вентиляторы противопожарного и общего назначения и их установки
- Противопожарные клапаны
- Шкафы управления противопожарными вентиляторами и клапанами
- Комплектующие для производства вентиляторов

Приглашаем посетить высокотехнологичное производство современного вентиляционного оборудования с участием в семинарах по техническим параметрам оборудования «Аэрдин»



WWW.AERDYN.RU