

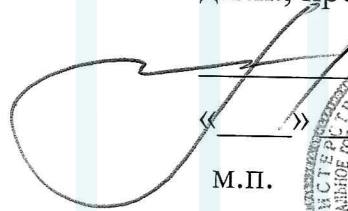
Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)

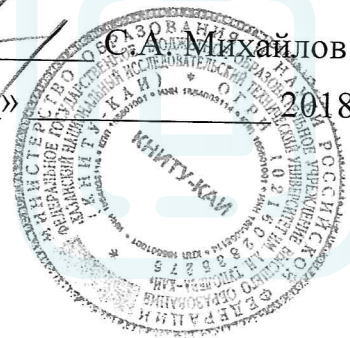
УДК  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
КНИТУ-КАИ


д.т.н., профессор

  
«          »  
М.П. С.А. Михайлов  
2018 г.



ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
«Исследования характеристик ротационной вентиляционной турбины  
«Турбодефлектор Rotado»

Ответственный исполнитель


  
14.05.18 В.В. Пахов  
Подпись, дата

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

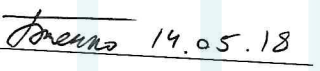
Научный сотрудник,  
без ученой степени, без ученого  
звания

 14.05.18 В.В. Пахов  
подпись, дата

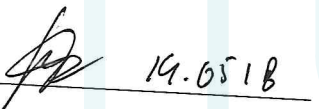
Младший научный сотрудник,  
без ученой степени, без ученого  
звания

 14.05.18 Р.П. Степанов  
подпись, дата


Ведущий инженер,  
без ученой степени, без ученого  
звания

 14.05.18 А.Н. Боженко  
подпись, дата

Техник высокой квалификации,  
без ученой степени, без ученого  
звания

 14.05.18 В.В. Строкин  
подпись, дата

Инженер, без ученой степени,  
без ученого звания

 14.05.18 М.А. Ледянкин  
подпись, дата

## Реферат

Научно-технический отчет 43 страницы, 25 рисунков, 17 таблиц, 2 приложения.

### ВЕНТИЛЯЦИЯ, ROTADO, АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА, СТА-СИСТЕМА.

Объектом научного исследования являлась ротационная вентиляционная турбина «Турбодэффлектор Rotado» (далее в тексте – Rotado). Главной целью работ было определение объемного расхода воздуха (объема удаляемого воздуха) в вентиляционном канале Rotado различных типоразмеров. Основным методом исследований был выбран метод экспериментальных исследований в аэродинамической трубе Т-1К КНИТУ-КАИ. Для измерения скоростей потока была использована СТА - система DANTEC.

Кроме значений скоростей потока в аэродинамической трубе (определялось для повышения точности эксперимента) и скорости в вентиляционном канале, а также объемного расхода воздуха в вентиляционном канале был определен ряд параметров, таких как коэффициенты сопротивления при различных углах поворота вентиляционного канала, падения напора при этих углах. Сделан вывод об эффективности Rotado различных типоразмеров. Создана методика подбора Rotado в зависимости от требуемого объема удаляемого воздуха. Рассмотрены вопросы создания комбинированной вентиляционной системы на основе Rotado и электровентиляторов. На данный момент не существует открытых опубликованных работ, в которых были бы приведены экспериментально полученные характеристики ротационных вентиляционных турбин. Это делает результаты, приведенные в данном отчете, актуальными и соответствующими критерию научной новизны.

Результаты данной работы (методика подбора типоразмера Rotado по требуемому объему удаляемого воздуха) могут быть внедрены в практику в самое ближайшее время. Тематика исследований данного отчета может быть расширена, в частности, проведением исследований по минимальной дистанции между Rotado для их эффективной работы.

## Введение

Данный отчет посвящен аэродинамическим исследованиям ротационной вентиляционной турбины Rotado. Данное устройство осуществляет естественную вытяжную вентиляцию. Данные исследования были необходимы, так как получены результаты об эффективности Rotado в сравнении с открытой вентиляционной шахтой, характере зависимости объема удаляемого воздуха от скорости ветра, достоинствах и недостатках Rotado.

Современное состояние проблемы таково, что большинство устройств естественной вентиляции на территории РФ производится без учета каких-либо факторов аэродинамики, что напрямую влияет на их эффективность. Материалы данного отчета не только позволяют применить эмпирически обоснованную методику для расчета системы естественной вентиляции, но и наметить пути для дальнейшего усовершенствования конструкции Rotado. Таких исследований на территории России не проводились, а зарубежные материалы в основном охраняются коммерческой тайной.

Данная работа проводилась с использованием аэродинамической трубы Т-1К, имеющей сертификат Госстандарта о том, что она является эталонным средством измерения, № сертификата 12022, № эталонного средства измерения 22836-02. Испытания проводились при помощи термоанемометрической системы Dantec. Калибровка термоанемометрической системы проводилась с использованием эталонных средств измерений.

Rotado можно отнести к вертикально-осевым ветроустановкам. Исследования характеристик таких ветроустановок следует признать крайне актуальными вследствие ряда значительных преимуществ, таких как независимость от направления ветра, компактность и ряда других. Повышение эффективности таких ветроустановок позволит повысить долю использования альтернативных возобновляемых источников энергии.

## 1 Анализ соответствия ротационной турбины Rotado действующим в настоящее время ГОСТам и СНиПам

В настоящее время на территории Российской Федерации действует ряд нормативных документов, регламентирующих вентиляцию жилых помещений. Ни в одном из них не содержится требований к типу или конструкции вентиляционного устройства. Так как ротационная турбина Rotado не содержит каких-либо электрических или иных двигателей, то в данном разделе не рассматриваются требования к электробезопасности. Следует отметить, что в нормативных документах, как правило, рассматриваются требования к микроклимату в помещениях, в том числе параметры температуры и влажности воздуха. Сам по себе Rotado способен только обеспечить некоторый объем удаляемого воздуха, который, к тому же, сильно зависит от скорости ветра. Среднегодовая скорость ветра в Поволжском регионе не превышает 4-6 м/с, поэтому для создания качественной автономной системы вентиляции помещения (тем более, с высокими требованиями к качеству воздуха) необходимо использовать систему кондиционирования. Однако, дорогие кондиционеры в ряде случаев может заменить простая автоматизированная система на одноплатных компьютерах (например, Arduino или Raspberry PI) с использованием Rotado и стандартного вентилятора с регулируемой скоростью вращения. Пример такой системы будет рассмотрен в разделе 8 настоящего отчета.

Общие требования к воздуху и климатическим условиям на рабочем месте и в помещениях общего назначения регламентируют ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей среды» и СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». Эти два документа отличаются тем, что в ГОСТ 12.1.005-88 приводятся основные параметры микроклимата для различных классов работ в теплое и холодное время года, даны определения основным терминам и уделено внимание ПДК вредных веществ. Кроме того, приведена методика измерения параметров воздуха для определения соответствия помещения данному ГОСТу.

В СНиП 2.04.05-91 приведены методики расчета требуемого количества удаляемого воздуха для различных типов помещений и различных классов работ, кроме того, даны расчетные параметры наружного воздуха для различного географического местоположения объекта. Кроме вентиляции, в данном СНиПе уделено внимание кондиционированию и отоплению помещений, что также может представлять интерес для расчета комбинированной системы вентиляции и кондиционирования.

Кроме СНиП 2.04.05-91, существует СНиП 23-01-99 «Строительная климатология», где также указаны параметры наружного воздуха, в т.ч. средняя скорость ветра. Данный СНиП может дать исходные данные для расчета вентиляции для конкретного помещения с использованием методик СНиП 2.04.05-91 и данных настоящего отчета по производительности (объему удаляемого воздуха) для конкретного устройства Rotado.

Также существует более новый свод правил СНиП 41-01-2003 «Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование», в котором также указаны методики расчета вентиляций и требования к системам вентиляции, в том числе требования по шумности систем вентиляции (не более 110 дБА для аварийной системы). Устройство Rotado согласно предварительным измерениям с использованием оборудования АДТ Т-1К удовлетворяет этим требованиям.

Требования к микроклимату в различных типах помещений устанавливает ряд нормативных документов, в том числе ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях», ГОСТ 52539-2006 «Чистота воздуха в лечебных учреждениях», ГОСТ 56638-2015 «Чистые помещения. Вентиляция и кондиционирование воздуха», ГОСТ Р ЕН 13779-2007 «Вентиляция в нежилых зданиях». Данные нормативные документы устанавливают различные параметры воздуха для различных классов помещений, однако использование Rotado не противоречит ни одному из них. Во всех случаях Rotado может быть использован как минимум в составе комбинированной системы вентиляции, если требования к температуре и влажности воздуха не позволяют обойтись без автоматизированной системы кондиционирования. Кроме того, в данных документах описаны методики испытаний помещений на соответствие помещения данным ГОСТам. Кроме объема удаляемого воздуха, в данных документах рассмотрены ПДК вредных веществ.

Единственный нормативный документ, в котором описаны примеры конструкции устройств для вентиляции помещений, это ГОСТ 32548-2013 «Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства». В нем приведены типовые устройства различных диффузоров для различных типов вентиляции и методики их расчета. Согласно данным этого отчета, Rotado в большинстве случаев эффективнее данных устройств.

В целом, из анализа нормативных документов, регулирующих требования к вентиляции на территории Российской Федерации в настоящий момент следует, что нормируются требования к конкретным помещениям, а не к системам вентиляции. Те требования, которые все же предъявляются к системам вентиляции (например, требования по шуму) как правило содержат

значения, которых технически исправный Rotado достичь не способен. Таким образом, использование Rotado в составе системы естественной вентиляции позволяет, в общем случае, обойтись меньшими диаметрами вентиляционных шахт или увеличить удельный объем удаляемого воздуха для большего комфорта. Использование Rotado в составе комбинированной системы вентиляции позволит, как минимум, уменьшить затраты электроэнергии в системе, и тем сильнее, чем больше скорость ветра. Из анализа нормативных документов (ГОСТов, СНиПов) можно заключить, что Rotado удовлетворяет всем стандартам, действующим в настоящее время на территории Российской Федерации.

## 2 Объект испытаний

Ротационная турбина Rotado относится к вытяжным вентиляционным устройствам, использующим энергию ветра для создания тяги в вентиляционном канале. Конструктивно Rotado представляет собой комбинацию многолопастного вертикально-осевого ветряка (вариация ротора Савониуса) и центробежного насоса. При этом при обдувке конструкции ветром возникает центробежная сила, которая и создает тягу в вентиляционном канале. Схема Rotado представлена на рисунке 1.

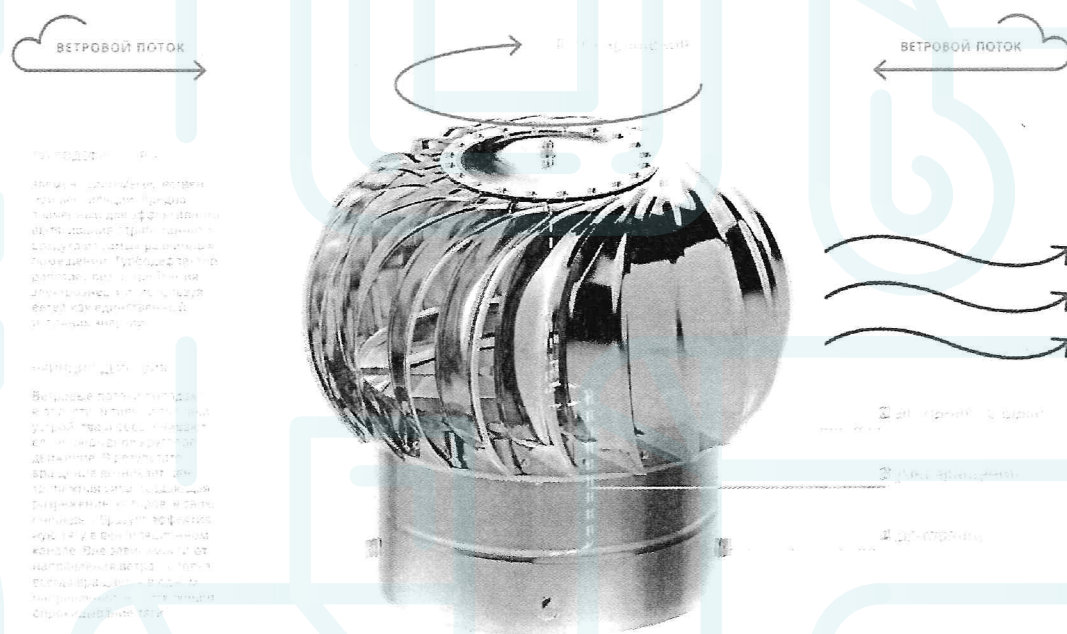


Рисунок 1 – Схема Rotado.

Основное преимущество Rotado – простота, а значит, и дешевизна конструкции. Кроме того, энергия ветра относится к возобновляемым источникам, следовательно, Rotado – энергосберегающее устройство. Кроме того, Rotado обладает малым весом и прост в монтаже и обслуживании.

Основной недостаток Rotado тесно связан с его достоинством. В основе Rotado лежит вертикально-осевая ветроустановка, представляющая собой многолопастную вариацию ротора Савониуса. Согласно исследованиям различных ветроустановок, проведенным в аэродинамической лаборатории КНИТУ-КАИ, коэффициент использования энергии ветра вертикально-осевых ветроустановок вообще и ротора Савониуса в частности, весьма низок (рисунок 2, кривая 4).

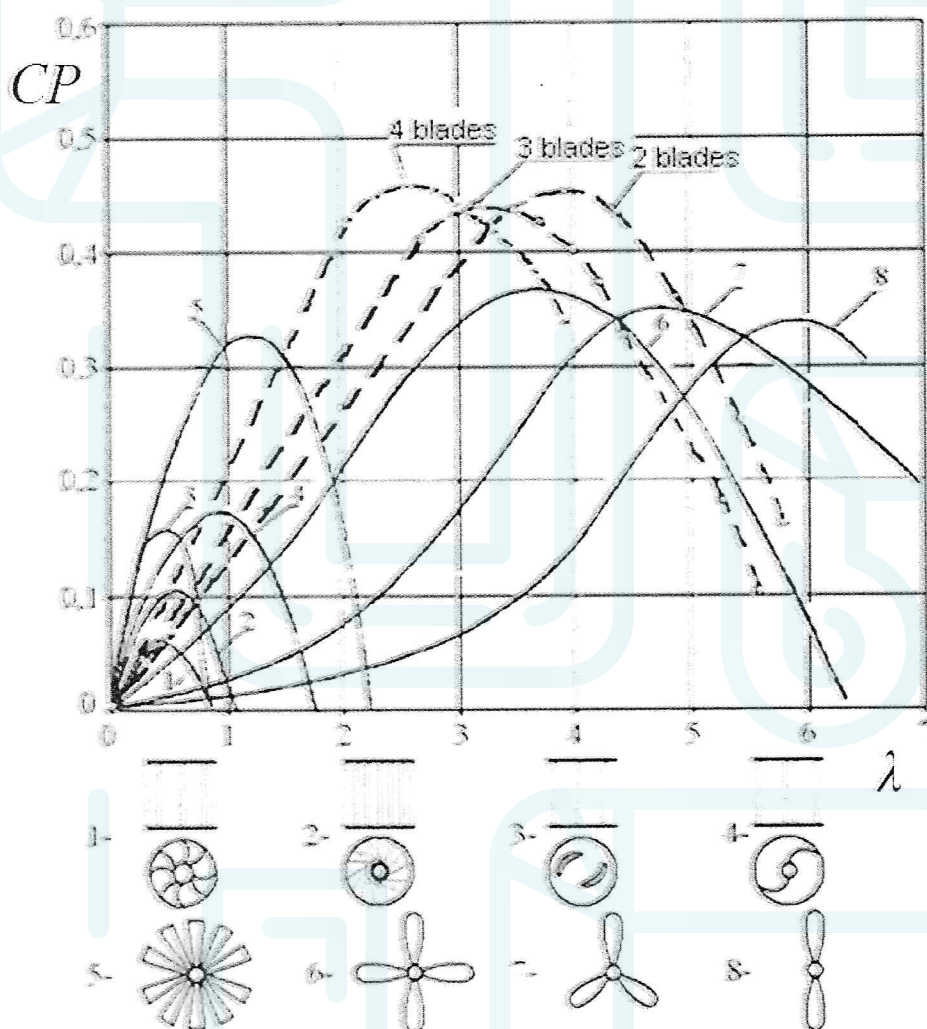


Рисунок 2 – Эффективность различных типов ветроустановок

Rotado относится к быстроходным ветрякам. Так как вал Rotado вращается свободно, без какой-либо нагрузки, то рабочая точка Rotado находится в правой части кривой на рисунке 2. Таким образом, в Rotado



используется очень малый процент энергии ветра. Для повышения процента необходимо смещать рабочую точку в сторону меньшей быстроходности, что усложнит конструкцию и в общем случае, лишит Rotado его основного преимущества.

Также к недостаткам Rotado по сравнению, например, с дефлектором ЦАГИ, относится наличие движущихся частей. Этот недостаток в значительной мере может быть нивелирован хорошей балансировкой ротора и качеством изготовления.

### 3 Экспериментальная установка

Для проведения исследований аэродинамических характеристик ротационной турбины Rotado была использована аэродинамическая труба Т-1К. Аэродинамическая труба Т-1К – малых скоростей, замкнутого типа, с открытой рабочей частью. Максимальная скорость потока в аэродинамической трубе Т-1К – 50 м/с, начальная турбулентность потока – 0,5%. Аэродинамическая труба сертифицирована в качестве эталонной и внесена в реестр особо ценных средств измерений. Копия сертификата представлена в приложении А, на рисунке А.1.

Для измерения скоростей потока в вентиляционном канале Rotado и в рабочей части аэродинамической трубы была использована термоанемометрическая система фирмы DANTEC на основе технологии СТА (Constant Temperature Anemometry). Данная система не является штатной для аэродинамической трубы Т-1К и выбрана исходя из требований программы испытаний (термоанемометрия больше подходит для измерения малых скоростей). Действие системы основано на принципе конвективного теплообмена между раскаленной тонкой проволокой и набегающим потоком воздуха. Скорость охлаждения раскаленной проволоки зависит от таких параметров как скорость набегающего потока, диаметра раскаляемой нити и др. В СТА-системе DANTEC применены нитевые датчики. Чувствительным элементом в них является проволока микроскопической толщины (около 5 микрон для СТА-системы трубы Т-1К).

Нитевые термодатчики предназначены для измерений колебаний в значениях набегающего потока (к примеру, значений скорости и интенсивности турбулентности). Однонитевой термодатчик состоит из очень тонкой проволоки, которая натянута на иглообразные опоры (Рисунок 3).

Как правило, в качестве материала для нити термодатчика используется вольфрам. Максимальная рабочая температура для него - 300 °С и он может использоваться при измерениях сверхзвуковых потоков.

Большинство накаляемых проводов в термодатчиках имеют диаметр  $5 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ мм}$ ) и длину в несколько миллиметров. Как правило, вольфрамовую нить присоединяют к опорам, сделанным из нержавеющей стали (рисунок 3) посредством точечной сварки. Сигнал от нагреваемого провода проходит через кабели в виде электрических сигналов.

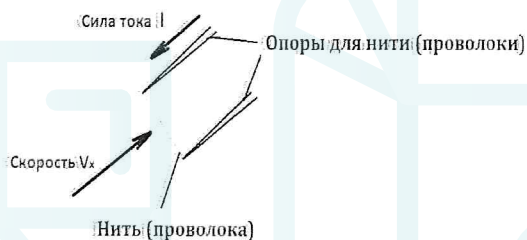


Рисунок 3 - Схематическое изображение однонитевого термодатчика

Датчик термоанемометра нуждается в калибровке. Для калибровки датчика была использована аэродинамическая труба Т-1К и ее штатные средства измерений. Калибровка датчиков термоанемометра проводилась каждый день перед началом испытаний согласно методике работы с СТА-системой.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4. На данном рисунке схематически показана установка Rotado с имитатором вентиляционного канала, выполненного в виде трубы длиной 1 м. Также на схеме показан изгиб канала вентиляционной системы размером 90 градусов (такие испытания проводились только для Rotado типоразмера 315). Для всех типоразмеров Rotado использовались имитаторы вентиляционных каналов длиной 1 м для вывода среза канала из потока аэродинамической трубы Т-1К. Датчик термоанемометра был установлен посередине имитатора вентиляционного канала. Как показали предварительные испытания, месторасположение датчика термоанемометра не оказывает заметного влияния на характеристики (см. таблица 1 и рисунок 5). Для этих испытаний датчик термоанемометра устанавливался в следующих положениях: Верхнее (250 мм от среза патрубка Rotado), среднее (500 мм от среза патрубка Rotado), нижнее (750 мм от среза патрубка Rotado). Для предварительных испытаний использовался Rotado типоразмера 300. Скорости потока выбраны соответствующие программе испытаний. В таблице 1 и далее во всем отчете приняты следующие обозначения:  $V_{\text{тр}}$  – скорость потока в аэродинамической трубе;  $V_{\text{к}}$  – скорость потока в вентиляционном канале Rotado.

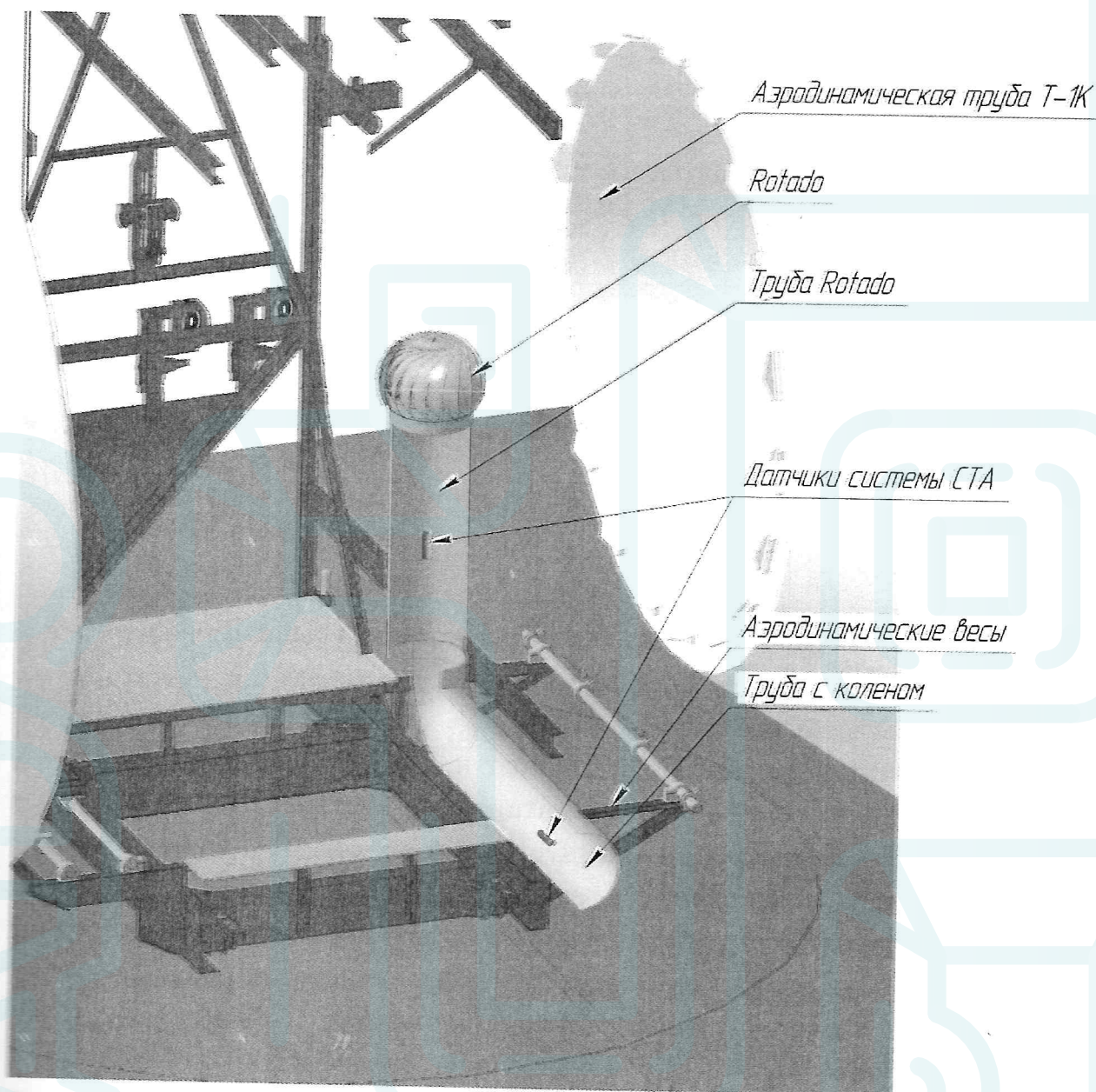


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки с устройством Rotado

Таблица 1 – данные предварительных испытаний

Датчик 250 мм		Датчик 500 мм		Датчик 750 мм	
V гр	Vк	V гр	Vк	V гр	Vк
0.597	0.01	0.442	0.024	0.642	0.01
1.078	0.01	0.786	0.01	1.001	0.01
2.12	0.425	1.956	0.245	2.047	0.357
3.064	1.041	2.985	0.995	3.023	0.83
4	1.495	4.019	1.256	4.032	1.592
4.942	1.875	4.97	1.754	5.015	1.835
6.025	2.266	5.973	1.913	6.005	2.248
7.089	2.331	6.966	2.209	7.074	2.394
10.04	3.289	9.991	3.314	9.997	3.434
15.014	5.061	14.892	4.388	15.123	5.201
19.973	6.314			19.803	7.343

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

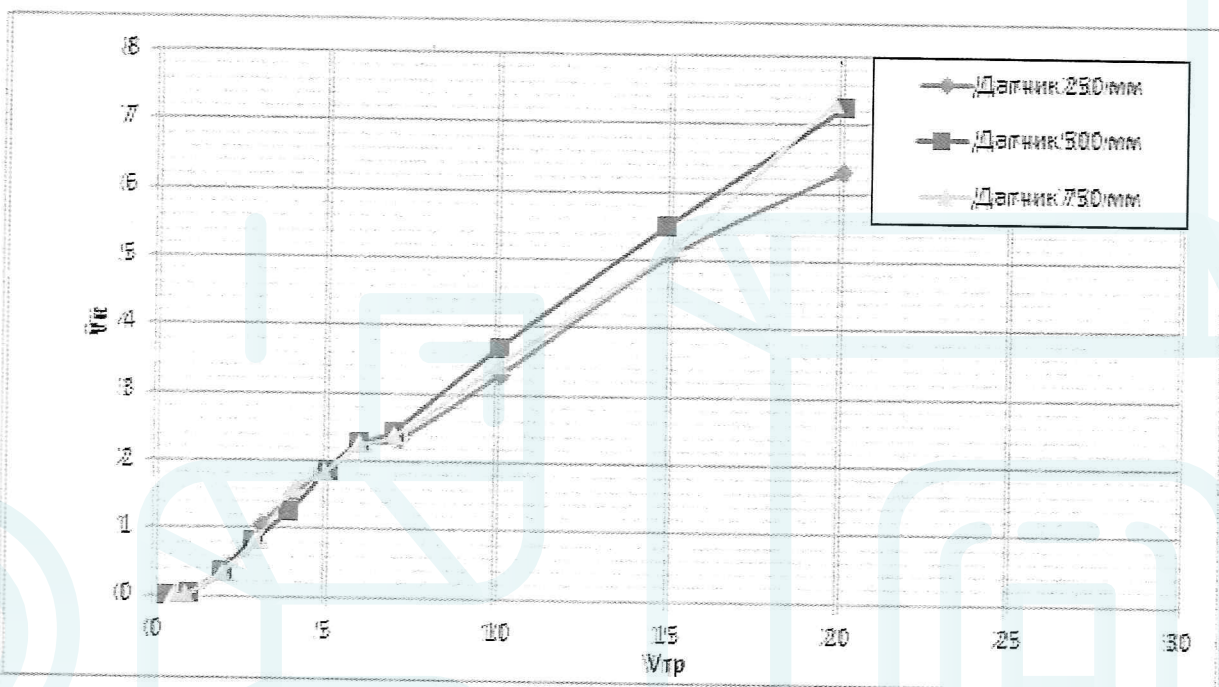


Рисунок 5 – Данные предварительных экспериментальных исследований Rotado

Как видно из рисунка 5 и таблицы 1, датчик в положении «250 мм» выдает несколько меньшие результаты, чем остальные два датчика. Датчики же «500 мм» и «750 мм» не имеют существенной разницы между собой. В дальнейшем из соображений удобства все измерения проводились при среднем положении датчика («500 мм»). Кроме того, в этом положении зафиксированы несколько меньшие пульсации скорости. На рисунке 4 изображен Rotado с имитатором изгиба вентиляционного канала на 90 градусов. Такие испытания проводились для Rotado типоразмера 315. Фотография экспериментальной установки с имитатором вентиляционного канала представлена на рисунке 6. В качестве имитатора вентиляционного канала использовалась стандартная гофрированная труба для вентиляционных устройств. Датчик термоанемометра устанавливался в ней также посередине поперечного сечения.

Кроме испытаний Rotado, были проведены испытания открытого имитатора вентиляционного канала, для анализа эффективности Rotado. В целом испытания, описанные в данном отчете показали однозначное повышение эффективности трубы с Rotado относительно открытой трубы. Основной отличительной особенностью испытаний по данному отчету явилось исследование предельно малых скоростей потока, что и потребовало использование термоанемометрической системы.

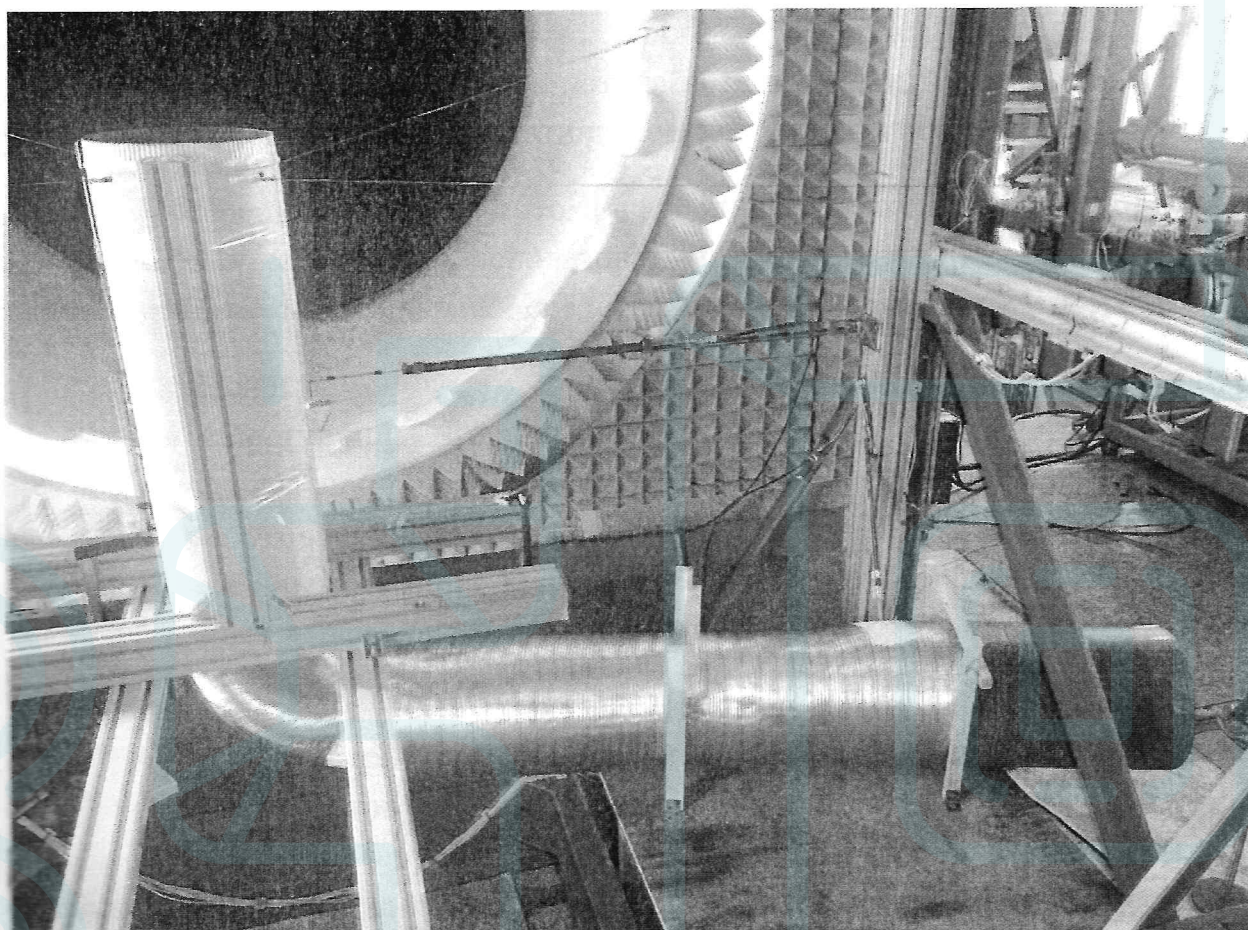


Рисунок 6 – Экспериментальная установка с имитацией поворота вентиляционного канала.

#### 4 Программа и методика экспериментальных исследований

Программа исследований ротационной турбины Rotado была изложена в техническом задании. Выдержка из технического задания:

5.1 Необходимо испытать следующие модели ротационных вентиляционных турбин типа Rotado 100, 110, 125, 160, 200, 250, 300, 315, 355, 400, 500, 600, 680, 800;

5.2 Каждую модель испытать при скоростях потока  $V_{\infty} = 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 20$  м/с. В случае, если скорость страгивания вентиляционной турбины будет более 0,5 м/с, исследования начинать со скорости страгивания;

5.3 Для каждой модели Rotado использовать вентиляционный канал фиксированной длины;

5.4 Замерить скорость потока в каждом канале без установки Rotado при скоростях потока  $V_x = 5, 10, 15, 20$  м/с;

5.4 Для каждой скорости  $V_{\infty}$  для каждой модели турбины Rotado необходимо определить скорость потока воздуха в вентиляционном канале, объемный расход воздуха  $Q$  и статическое давление в канале Rotado;

5.5 Измерения скоростей потока в аэродинамической трубе и скорости в канале Rotado необходимо использовать штатные средства, АДТ Т-1К. В отчете отразить характеристики средств измерений и методики измерений;

5.6 Расчетным путем необходимо определить следующие характеристики турбины Rotado: объемный расход воздуха в канале за турбиной, скоростной напор в вентиляционном канале, коэффициенты местного сопротивления при изгибе канала на 30, 45, 90 градусов, потери напора для данных изгибов каналов. Допускается расширить количество рассчитываемых характеристик;

В большинстве случаев скорость страгивания была значительно больше 0,5 м/с, замеренная скорость была порядка 1-1,5 м/с. Это может быть связано с неточностями изготовления и слабой конструкцией подшипникового узла Rotado. Кроме того, следует отметить, что ошибка измерений у анемометров крыльчатого типа на скоростях 0,5..1,5 м/с достаточно высока и термоанемометр дает более точные данные.

Так как особо малые скорости потока плохо поддаются измерению традиционными методами аэродинамических труб малых скоростей, было принято решение измерять скорости потока в аэродинамической трубе таким же термоанемометром, как и в имитаторе вентиляционного канала Rotado.

Для расчета параметров согласно Техническому Заданию, использовались следующие формулы:

- 1) Для расчета объемного расхода:  $Q = V \cdot d$ , где  $V$  – измеренная скорость потока в м/с,  $d$  – диаметр трубы турбоделектора в метрах. Полученное значение умножалось на 3600 для получения расхода в м<sup>3</sup>/ч;
- 2) Скоростной напор в вентиляционном канале определялся по формуле  $q = \frac{\rho \cdot V^2}{2}$ , где  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха,  $V$  – измеренная скорость в канале;
- 3) Коэффициент сопротивления поворота вентиляционного канала рассчитывался по формуле Некрасова  $\xi_{90} = 0,051 + 0,19 \cdot \frac{d}{R_{\text{изг}}}$ , где  $d$  –

диаметр канала,  $R_{\text{изг}}$  – радиус изгиба канала. В расчетах принято соотношение  $\frac{d}{R_{\text{изг}}} = 1$ ; По этой формуле определялся коэффициент сопротивления для изгиба трубопровода на 90 градусов. Также по формуле Некрасова для углов изгиба трубопровода меньше 90 градусов коэффициент сопротивления для углов поворота менее 90 градусов рассчитывался по формуле  $\xi_{\alpha} = \xi_{90} \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол поворота вентиляционного канала;

- 4) Потери напора в канале определялись по формуле  $h = \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$ ; Здесь  $V$  – скорость потока,  $g$  – ускорение свободного падения.

Для анализа эффективности Rotado введен коэффициент эффективности  $K_{\text{эф}}$ . Он определяется как отношение объемного расхода воздуха в вентиляционном канале Rotado к произведению скорости потока на площадь поперечного сечения Rotado. Это произведение имеет размерность объемного расхода и обозначается в дальнейшем  $Q_{\text{ид}}$ . Сам коэффициент эффективности безразмерный и обозначается  $K_{\text{эф}}$ .

На рисунке 7 показан график сравнения между собой различных типов Rotado при скорости потока около 10 м/с. Несмотря на разброс экспериментальных точек, на графике возможно уловить четкую тенденцию к падению коэффициента эффективности с увеличением типоразмера Rotado.

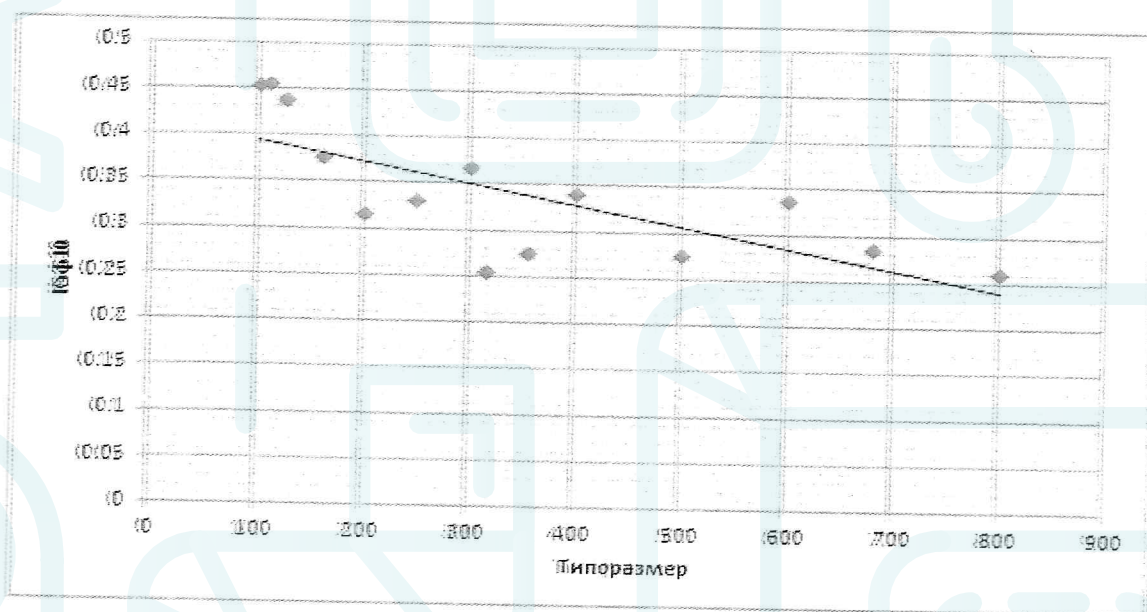


Рисунок 7 – Коэффициент эффективности для разных типов Rotado

## 6 Методика подбора Rotado для различных условий работы.

Основным критерием для подбора Rotado, согласно нормативным документам (см. раздел 1 настоящего отчета), является объем удаляемого воздуха или объемный расход в вентиляционном канале Rotado. На рисунке 10 представлен график зависимости объема удаляемого воздуха от скорости потока в аэродинамической трубе для Rotado типоразмера «315».

Данная зависимость может быть рассмотрена как линейная, остальные зависимости для других типоразмеров Rotado также могут быть рассмотрены как линейные (см. Приложения А и Б). Это позволяет эмпирическим путем вывести простые аналитические формулы для расчета объемного расхода воздуха в канале Rotado. Уравнение прямой определяется коэффициентами  $k$  и  $b$ , которые были определены для различных типоразмеров Rotado при помощи численного метода меньших квадратов из стандартного пакета системы LabView. Результаты представлены в таблице 4.

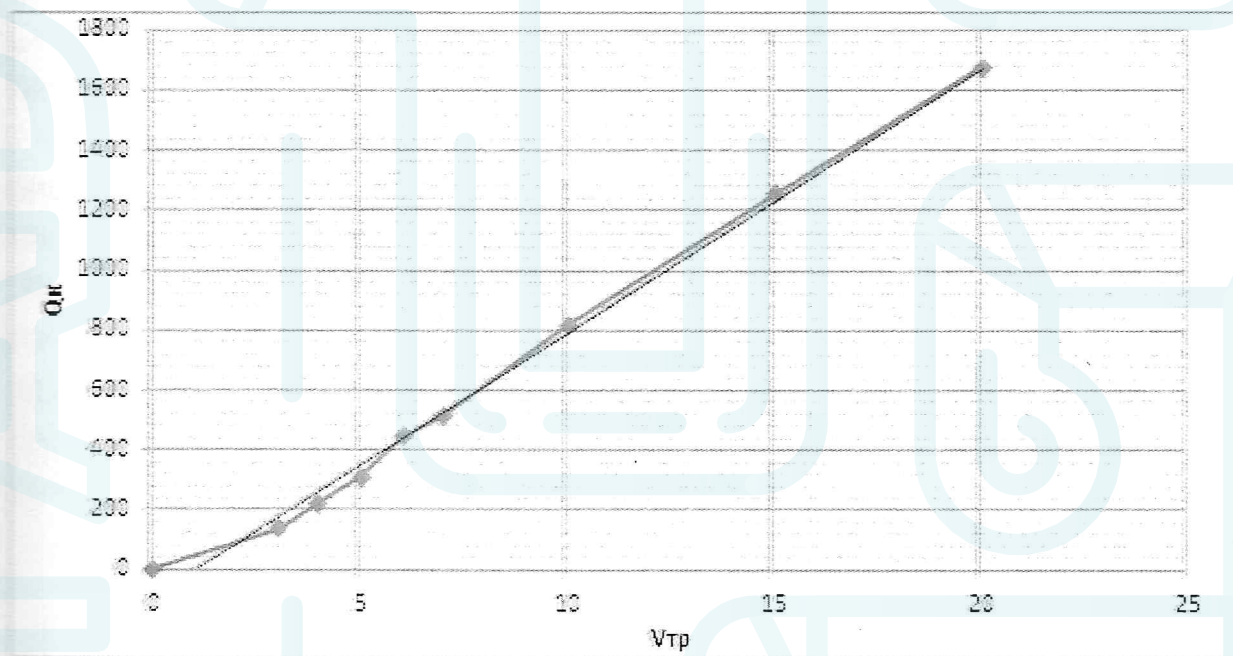


Рисунок 8 – Зависимость объема удаляемого воздуха (м<sup>3</sup>/ч) от скорости потока (м/с).



Таблица 2 – Результаты линеаризации данных экспериментальных исследований Rotado

Типоразмер	100	110	125	160	200	250	300
k	13.46	16.38	20.73	32.16	40.866	61.82	96.85
b	-8.845	-12.94	-13.67	-59.98	-66	-73.16	-60.09
Типоразмер	315	355	400	500	600	680	800
k	91.6	127.13	167.138	252.19	352.19	437.89	501.64
b	-134.88	-220.2	-156.18	-436.8	-245	-683.3	-502.9

По данным таблицы 2 можно определить зависимость коэффициентов  $k$  и  $b$  прямой зависимости объема удаляемого воздуха от типоразмера дефлектора. Такая зависимость представлена на рисунке 9. Такая зависимость носит полиномиальный характер и может быть просто описана полиномом второго порядка вида  $y = ax^2 + bx + c$ , где  $y$  – коэффициент  $k$ ,  $x$  – типоразмер Rotado,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – полиномиальные коэффициенты. После анализа зависимостей было получено следующее уравнения для получения коэффициента  $k$ :  $k = 0.0005d^2 + 0.292d - 30.715$ ; здесь  $d$  – типоразмер Rotado, брать в миллиметрах.

Зависимость коэффициента  $b$  от типоразмера Rotado представлена на рисунке 10. На этом рисунке видно, что разброс значений коэффициента  $b$  весьма велик и простой формы кривой определить по рисунку не удастся. Это связано с разбросом экспериментальных данных. Поэтому было принято решение аппроксимировать зависимость коэффициента  $b$  при помощи прямой. На основе аппроксимации было получено следующее уравнение прямой:  $b = -0.847d + 105.123$ ; Здесь  $b$  – коэффициент уравнения прямой,  $d$  – типоразмер Rotado (для расчета брать в миллиметрах).

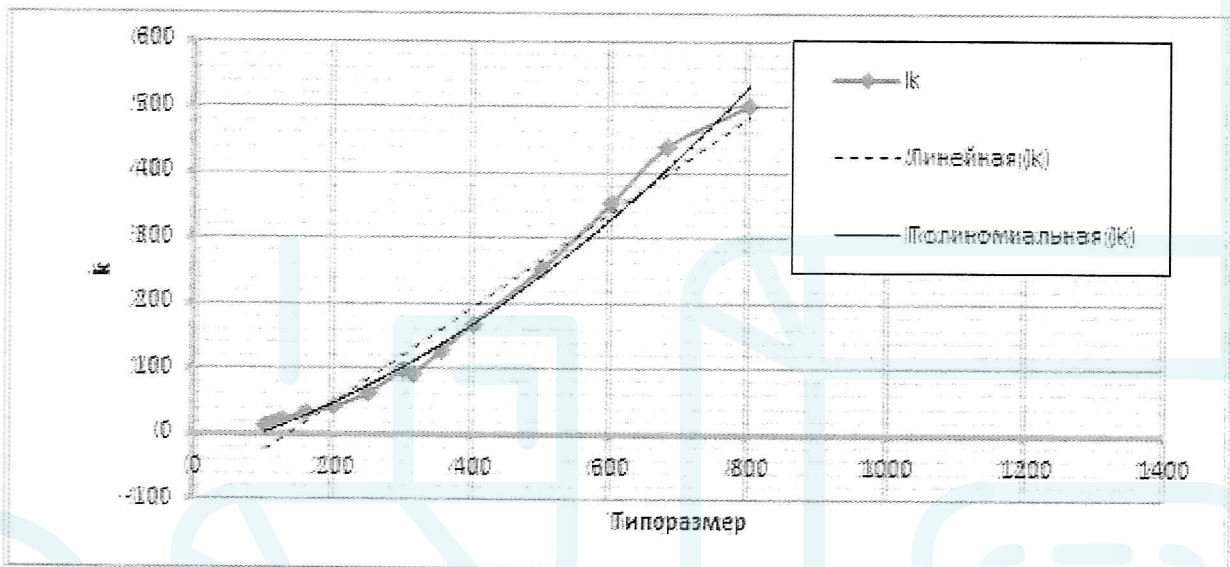


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента  $k$  (безразмерный) от типоразмера Rotado (в миллиметрах).

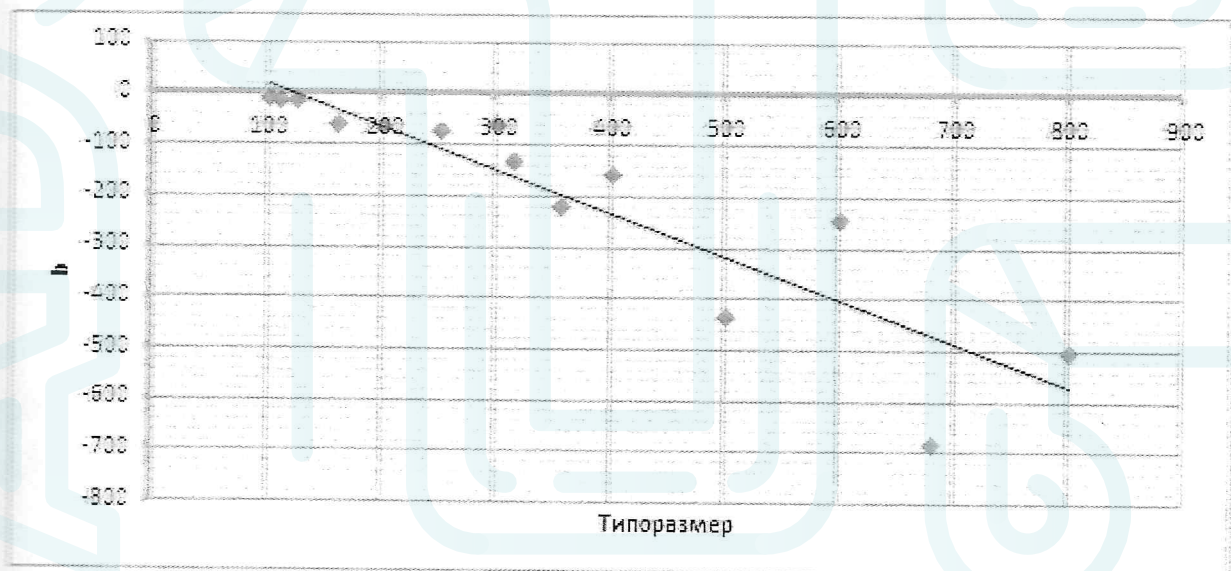


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента  $b$  (безразмерный) от типоразмера Rotado (в миллиметрах).

При работе Rotado с вентиляционными каналами большой длины необходимо учитывать потери напора на трение о стенки канала, местные потери и перепад высот. Они рассчитываются следующим образом:

$$\Delta h = \xi \frac{V^2}{2g};$$

Здесь  $\Delta h$  - величина потерь (на трение либо местные потери (поворот канала));  $\xi$  – коэффициент сопротивления;  $V$  – скорость потока;  $g$  – ускорение свободного падения.

Коэффициент сопротивления  $\xi$  для потерь на трение выражается формулой  $\xi = \lambda \frac{l}{d}$ , где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $l$  – длина канала,  $d$  – диаметр канала. Для вычисления коэффициента  $\lambda$  существуют несколько формул в зависимости от числа Рейнольдса и шероховатости стенок канала. Для гладкого канала: Для чисел Рейнольдса менее 2500:  $\lambda = \frac{75}{Re}$ ; Для чисел Рейнольдса от 2500 до 100000:  $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ ; Для больших чисел  $Re$  можно воспользоваться формулой:  $\lambda = \frac{1}{(1.81 \lg Re - 1.5)^2}$ . Для канала с естественной шероховатостью:  $\lambda = 0.11 \left( \frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$ . Здесь  $\Delta_3$  – эквивалентная величина выступов шероховатости.  $Re$  – число Рейнольдса – характеризует режим течения в канале. При  $Re$  менее 2500 режим течения ламинарный, выше – турбулентный.  $Re = \frac{vd}{\nu}$ ; В этой формуле  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха, подбирается по таблице 3.

Таблица 3 – Кинематическая вязкость воздуха при разных температурах

t, °C	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-10
$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	9,23	9,64	10,04	10,42	10,8	11,21	11,61	12,43
t, °C	-5	0	10	15	20	30	40	50
$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	12,86	13,28	14,16	14,61	15,06	16	16,96	17,95

Для учета различных потерь воспользуемся законом сохранения энергии. В механике газов закон сохранения энергии выражается в форме уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли имеет вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const;$$

Однако в чистом виде уравнение Бернулли относительно сложно для применения и в инженерных расчетах пользуются выражением  $H = const$ , где  $H$  – полный напор.

Полный напор равен:

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g};$$

Здесь  $z$  – вертикальная координата рассматриваемой точки,  $P$  – атмосферное давление,  $\rho$  – плотность воздуха.

Здесь полный напор равен

Для учета потерь рассмотрим полный напор вентиляционного канала в условиях, когда потерями можно пренебречь:  $H_{и} = z_{и} + \frac{P_{и}}{\rho_{и}g} + \frac{V_{и}^2}{2g}$ ;

Теперь рассмотрим полный напор с учетом потерь:

$$H_{р} = z_{р} + \frac{P_{р}}{\rho_{р}g} + \frac{V_{р}^2}{2g} + \Sigma h_{п};$$

Здесь  $\Sigma h_{п}$  – суммарная величина потерь.  $\Sigma h_{п}$  равна сумме всех потерь по длине вентиляционного канала. Примем допущение, что в эксперименте в аэродинамической трубе были получены характеристики Rotado, близкие к идеальным, и различными потерями в эксперименте можно пренебречь. Тогда можно приравнять напор в идеальном случае (эксперимент) и реальном (с потерями). Тогда:

$$z_{и} + \frac{P_{и}}{\rho_{и}g} + \frac{V_{и}^2}{2g} = z_{р} + \frac{P_{р}}{\rho_{р}g} + \frac{V_{р}^2}{2g} + \Sigma h_{п};$$

Считаем величину  $z + \frac{P}{\rho g}$  (статическое давление) неизменной и равной атмосферному давлению. Колебания атмосферного давления пренебрежимо малы по сравнению с потерями напора в вентиляционном канале. Поэтому можно принять допущение, что  $z_{и} + \frac{P_{и}}{\rho_{и}g} = z_{р} + \frac{P_{р}}{\rho_{р}g}$ ; Таким образом, выражение для напоров примет вид:  $\frac{V_{и}^2}{2g} = \frac{V_{р}^2}{2g} + \Sigma h_{п}$ ; Тогда, записав выражение относительно  $V_{р}$ , получим:

$$V_{р} = \sqrt{V_{и}^2 - 2g\Sigma h_{п}}$$

Таким образом, мы получим скорость потока в канале с учетом потерь с некоторыми допущениями. Далее по этому значению будет произведен расчет объема удаляемого воздуха в помещении.

На основании вышеизложенного, можно сформулировать методику расчета объема удаляемого воздуха (в м<sup>3</sup>/ч) от скорости потока (м/с).

Для иллюстрации корреляции между методикой расчета и экспериментальными данными по методике расчета проведены расчеты для Rotado типоразмера 680. После расчета характеристик Rotado, рассчитаем характеристики для вентиляционного отверстия, находящегося внизу длинной вертикальной цилиндрической шахты длиной 10 м диаметром 0,68 м с одним поворотом канала на 90 градусов. В случае, если повороты канала отсутствуют, суммарные потери считать равными потерям по длине.

1) Задать типоразмер Rotado. В примере будет рассматриваться типоразмер 680.

2) Определить коэффициенты  $k$  и  $b$  для данного типоразмера.  $k_{680} = 0.0005 \cdot 680^2 + 0.292 \cdot 680 - 30.715 = 399.045$ ;  $b_{680} = -0.847 \cdot 680 + 105.123 = -575.724$ ;

3) Определить среднегодовую скорость ветра в районе, где планируется установить Rotado. При отсутствии точных статистических данных

воспользоваться СНиП 23-01-99 «Строительная климатология». Для города Чебоксары он дает значение скорости ветра  $V_{\infty} = 5$  м/с.

4) Определить значение часового объема удаляемого воздуха по формуле  $Q = k \cdot V_{\infty} + b$ ; Тогда  $Q_{680} = 399.045 \cdot 5 - 575.724 = 1419.501$ ;

Далее следует учесть потери. Так как по условиям примера присутствуют и местные потери напора, и потери по длине, примем  $\Sigma h_{\pi} = \Delta h_{\text{м}} + \Delta h_{\text{д}}$ . Тогда:

5) Определить местные потери напора (для угла поворота канала 90 градусов), для чего используется значение  $\xi_{90}$  из таблицы 2, значение скорости потока для приближенных расчетов получить из  $Q_{680}$  (учесть, что расход измеряется в м<sup>3</sup>/ч, а скорость получается в м/с).  $V_{\text{и}} = \frac{Q}{3600 \cdot S} = 1,086$ ;  $\Delta h_{\text{м}} = \xi \frac{V_{\text{и}}^2}{2g} = 0.24 \cdot \frac{1,086^2}{2 \cdot 9.81} = 0.0144$  м;

6) Определить потери напора по длине (на трение о стенки канала). Вентиляционный канал будем считать гладким. Для этого определить сначала число Рейнольдса. По условиям примера, диаметр канала 0,68 м, возьмем кинематическую вязкость воздуха для нормальных условий (20°C). Тогда  $Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{1,086 \cdot 0,68}{15,06 \cdot 10^{-6}} \approx 49000$ . Это число находится в интервале от 2500 до 100 000, тогда коэффициент  $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = 0,0213$ . Тогда  $\Delta h_{\text{д}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V_{\text{и}}^2}{2g} = 0,0188$  м.

7) Определим скорость в конце вентиляционного канала с учетом потерь:

$$V_{\text{к}} = \sqrt{V_{\text{и}}^2 - 2g(\Delta h_{\text{м}} + \Delta h_{\text{д}})} = 0,59 \text{ м/с}; \text{ Тогда } Q_{\text{к}} = V_{\text{к}} \cdot S = 3600 \cdot 0,59 \cdot 0,363 = 771,012$$

Таким образом, видно, что скорости в начале и в конце вентиляционного канала могут значительно различаться при большой его длине и наличии значительных препятствий. При подборе Rotado следует это учитывать.

Для иллюстрации различий между расчетными значениями и экспериментально измеренными построен график на рисунке 11. Кроме того, на нем проиллюстрирован график с учетом потерь напора.

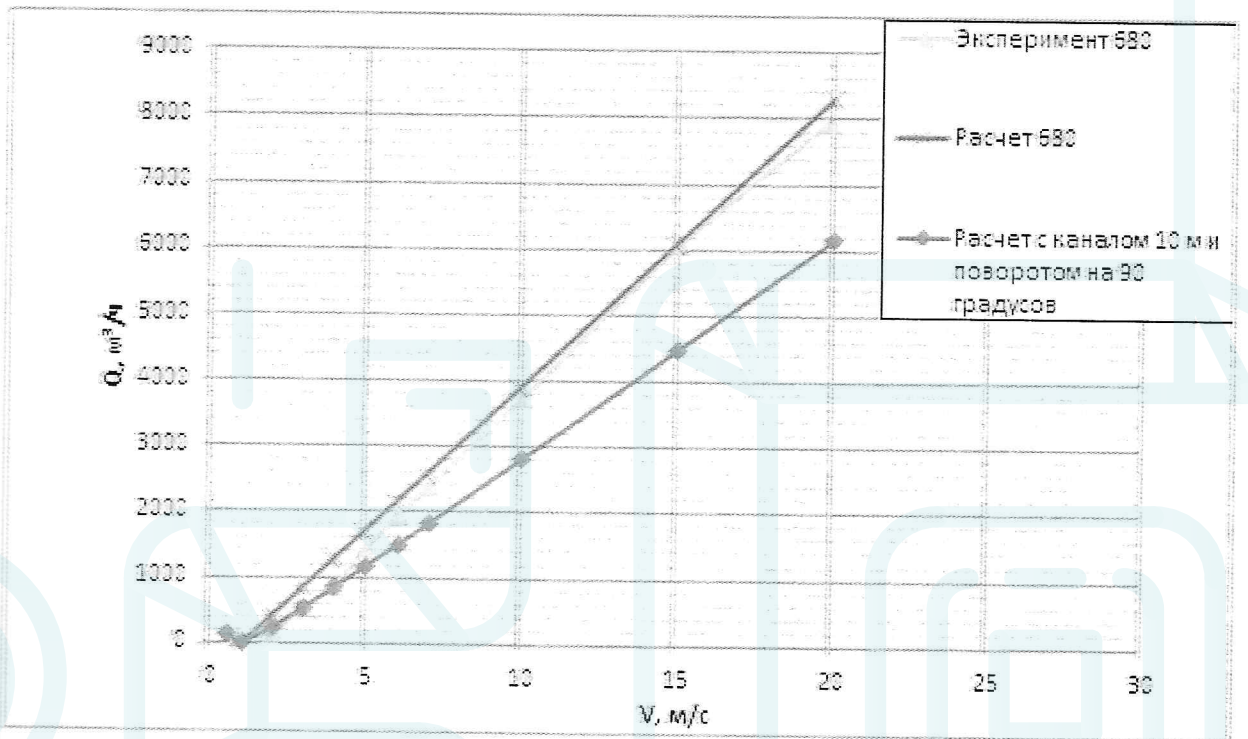


Рисунок 11 – Сравнение расчетного по эмпирическим формулам и экспериментально исследованного объема удаляемого воздуха от скорости ветра.

## Заключение

По результатам данной работы возможно заключить следующее:

1) Задачи НИР, поставленные в Техническом Задании решены в полном объеме. Проведены исследования аэродинамических характеристик Rotado разных типоразмеров, рассчитаны необходимые параметры, разработана методика подбора Rotado для обеспечения, проведена видеофиксация экспериментов и ее анализ, даны рекомендации по созданию комплексной системы вентиляции на основе электровентиляторов и Rotado.

2) Проведенные исследования аэродинамических характеристик Rotado показали, что они однозначно более эффективны в сравнении с открытой в атмосферу вентиляционной шахтой, и их эффективность возрастает с увеличением скорости ветра. Средний прирост эффективности по всем скоростям и типоразмерам составил 36%. Кроме того, анализ результатов экспериментов показал, что выгоднее использовать несколько Rotado меньшего диаметра вместо одного большого.

3) Разработанная и приведенная в данном отчете методика подбора Rotado исходя из требуемого объема удаляемого воздуха для помещения может быть использована для расчета количества и выбора типоразмера Rotado для помещений различного типа и назначения. Однако при ее применении следует иметь в виду, что объем удаляемого Rotado воздуха сильно зависит от скорости ветра в данный конкретный момент.

4) На данный момент в открытой печати не существует подробного анализа аэродинамических характеристик Rotado. Результаты данной работы позволят дать представление об основных аэродинамических характеристиках Rotado Rotado, их недостатках и путях дальнейшей модернизации Rotado.

Результаты экспериментов в графической форме



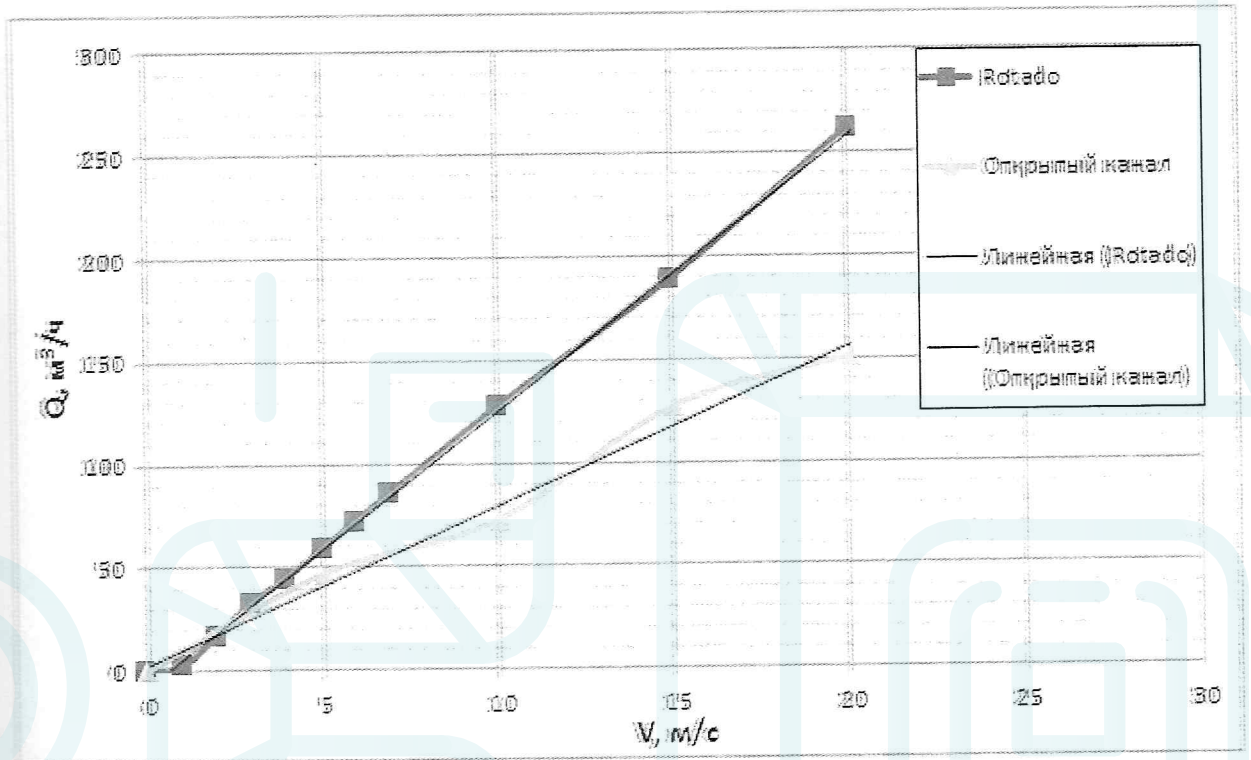


Рисунок А.1 - Rotado типоразмера «100».

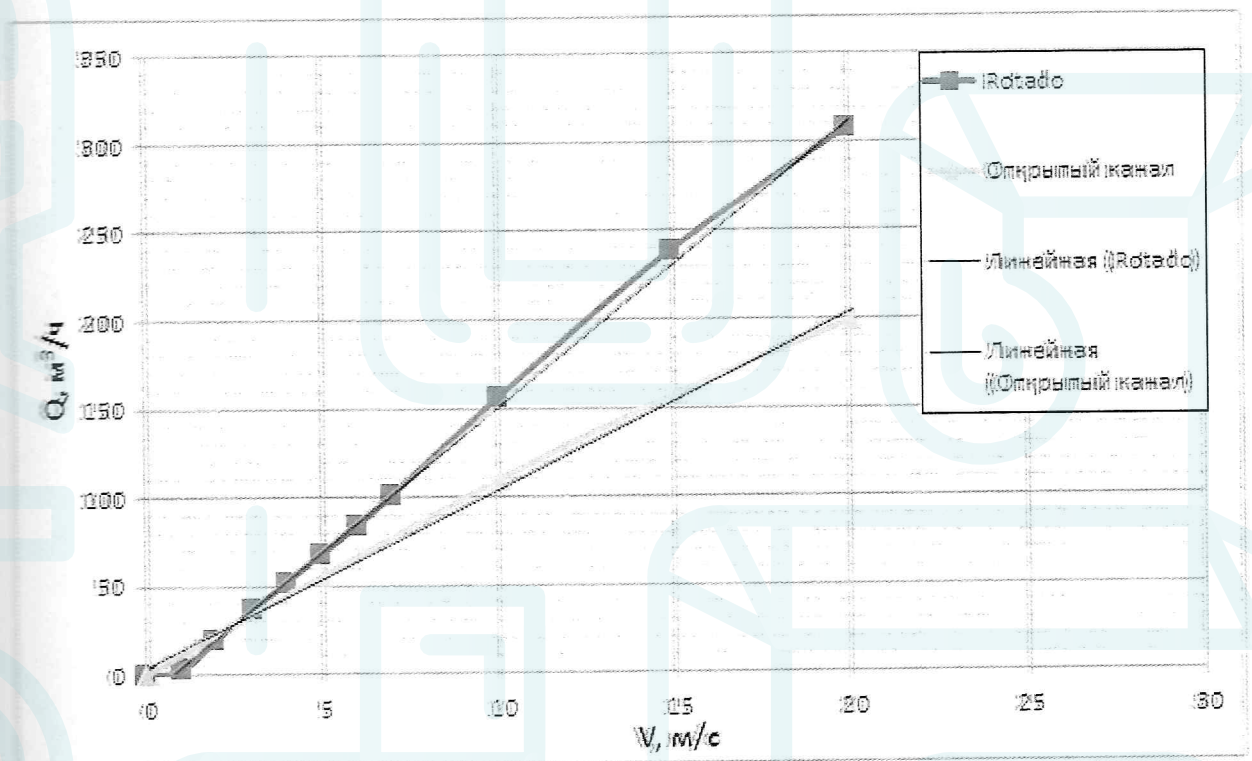


Рисунок А.2 - Rotado типоразмера «110».

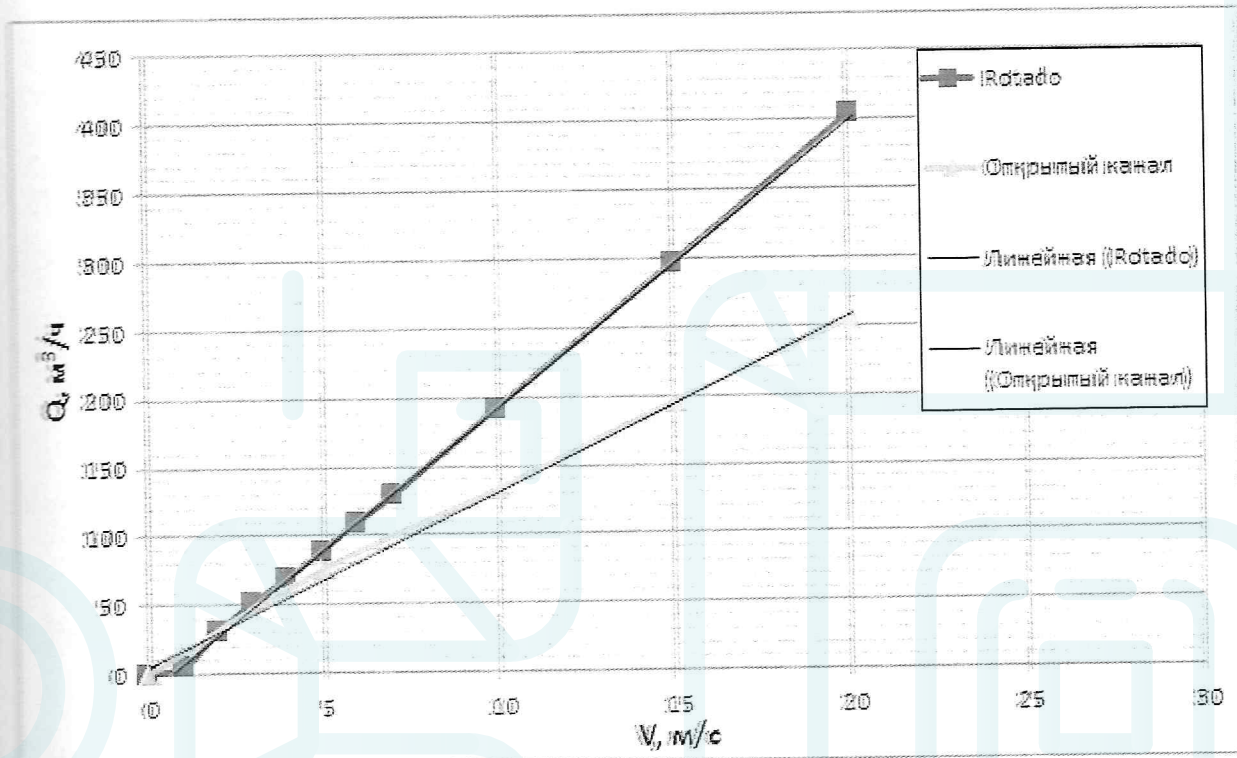


Рисунок А.3 - Rotado типоразмера «125».

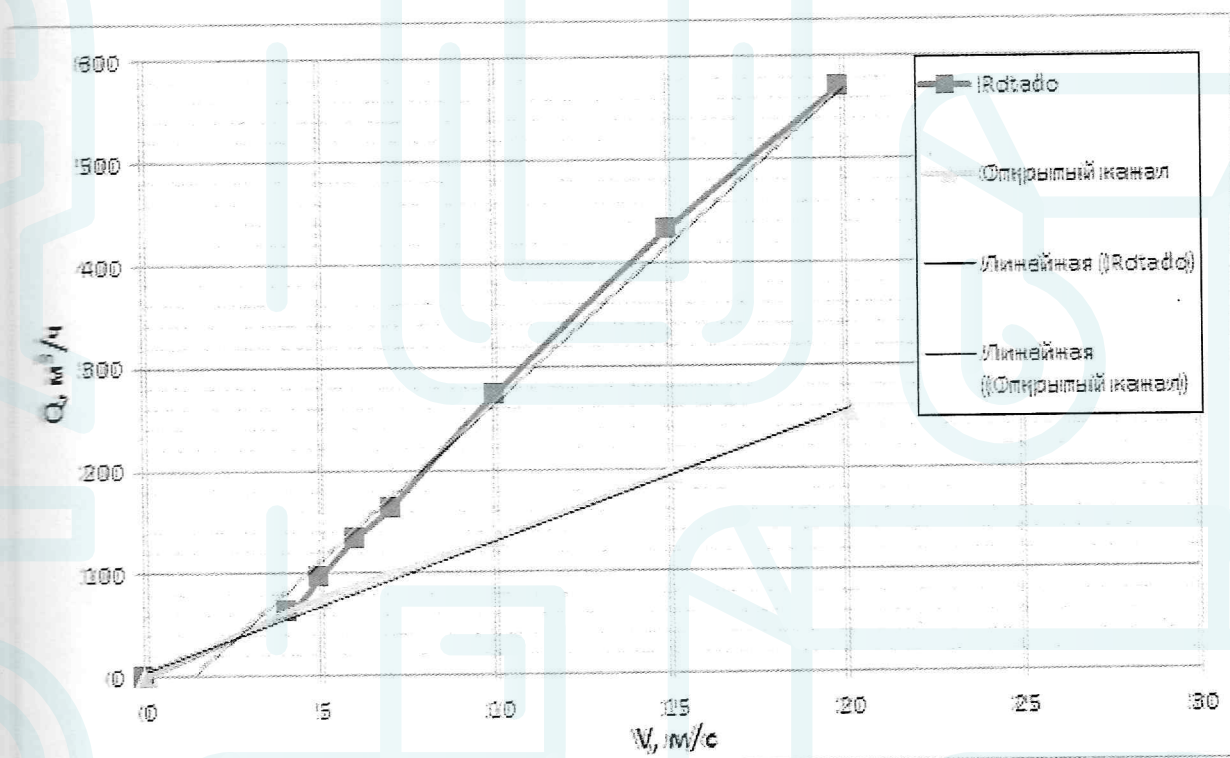


Рисунок А.4 - Rotado типоразмера «160».

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

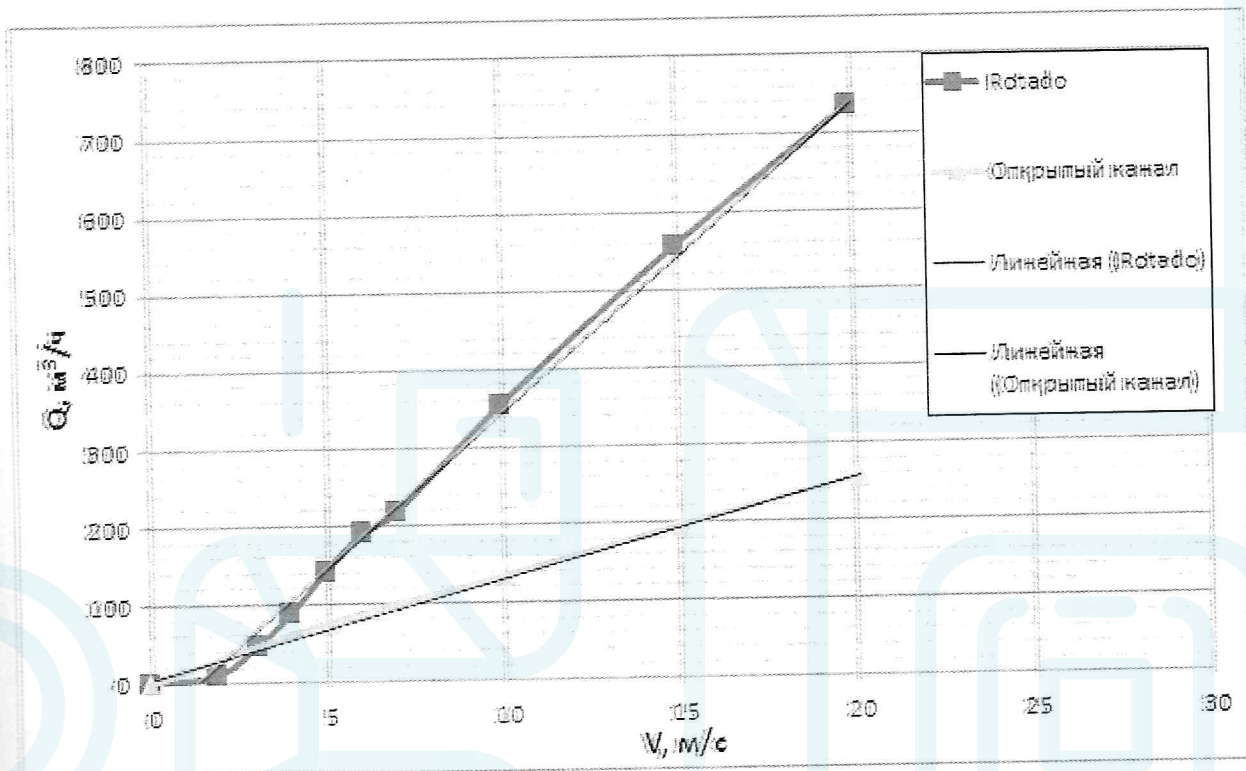


Рисунок А.5 - Rotado типоразмера «200».

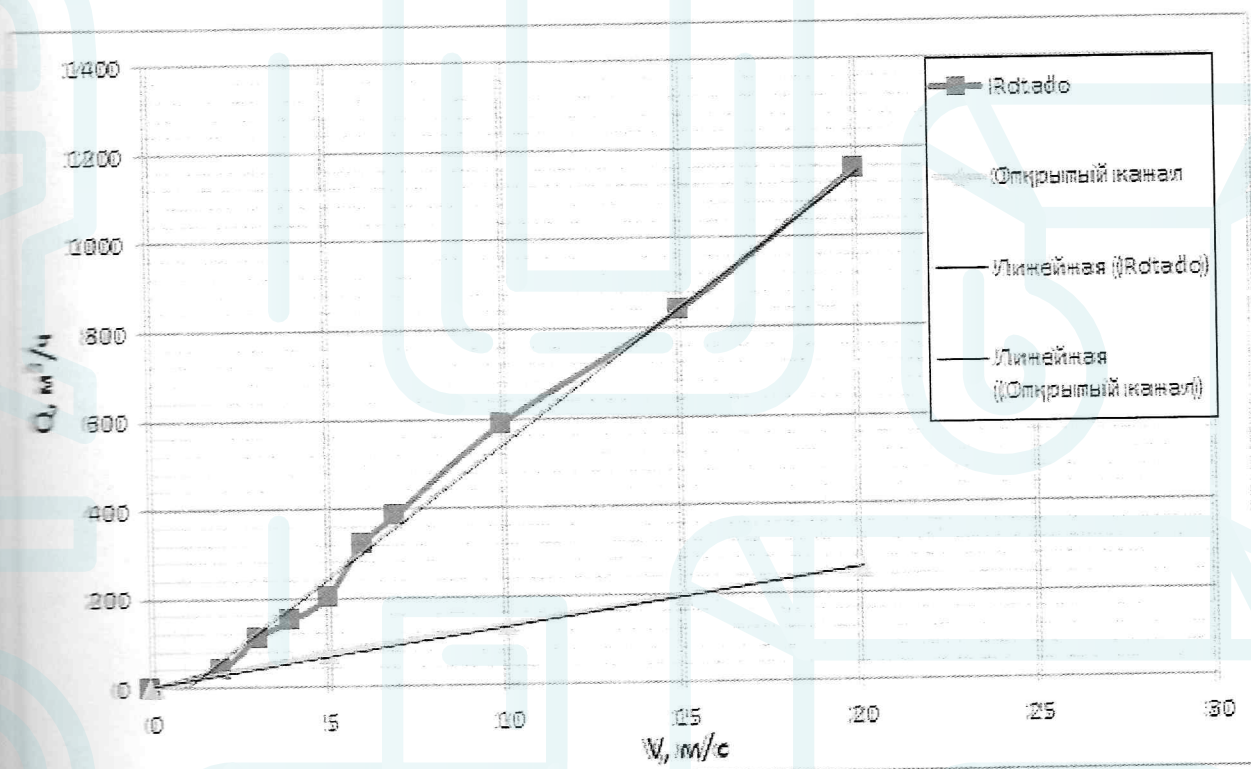


Рисунок А.6 - Rotado типоразмера «250».

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

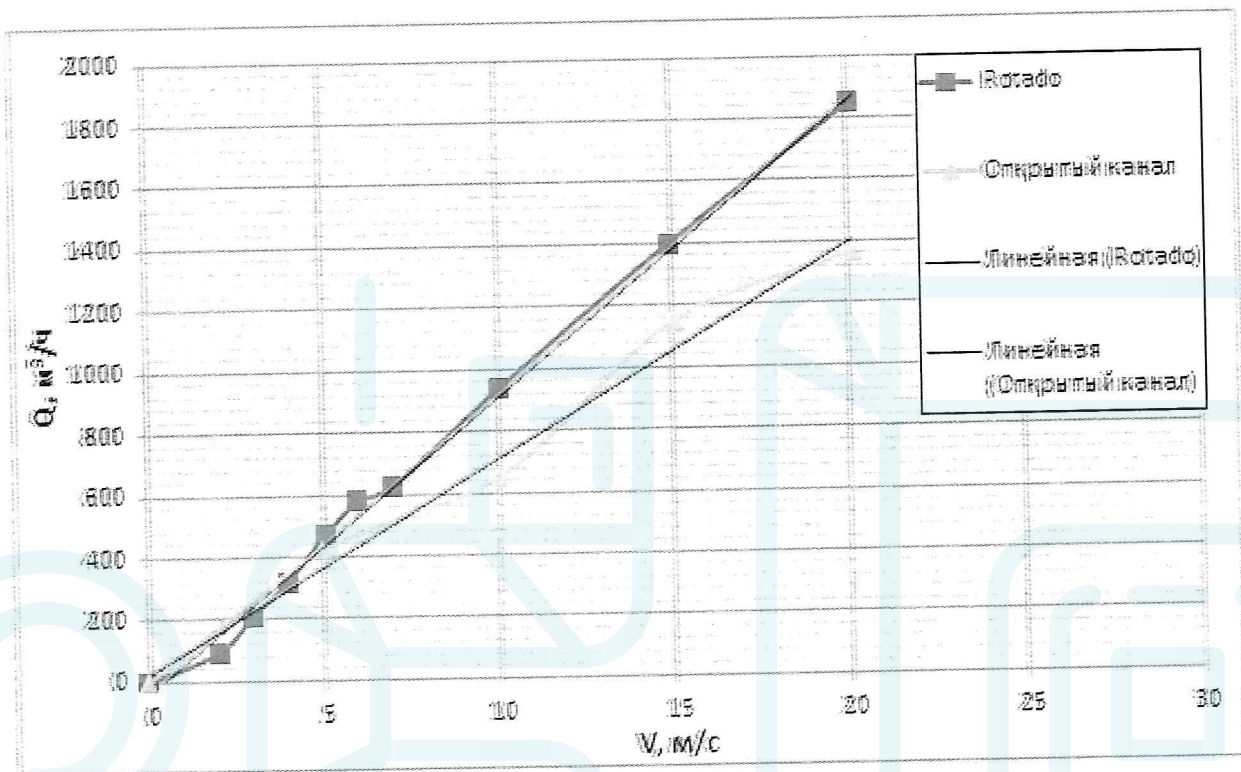


Рисунок А.7 - Rotado типоразмера «300».

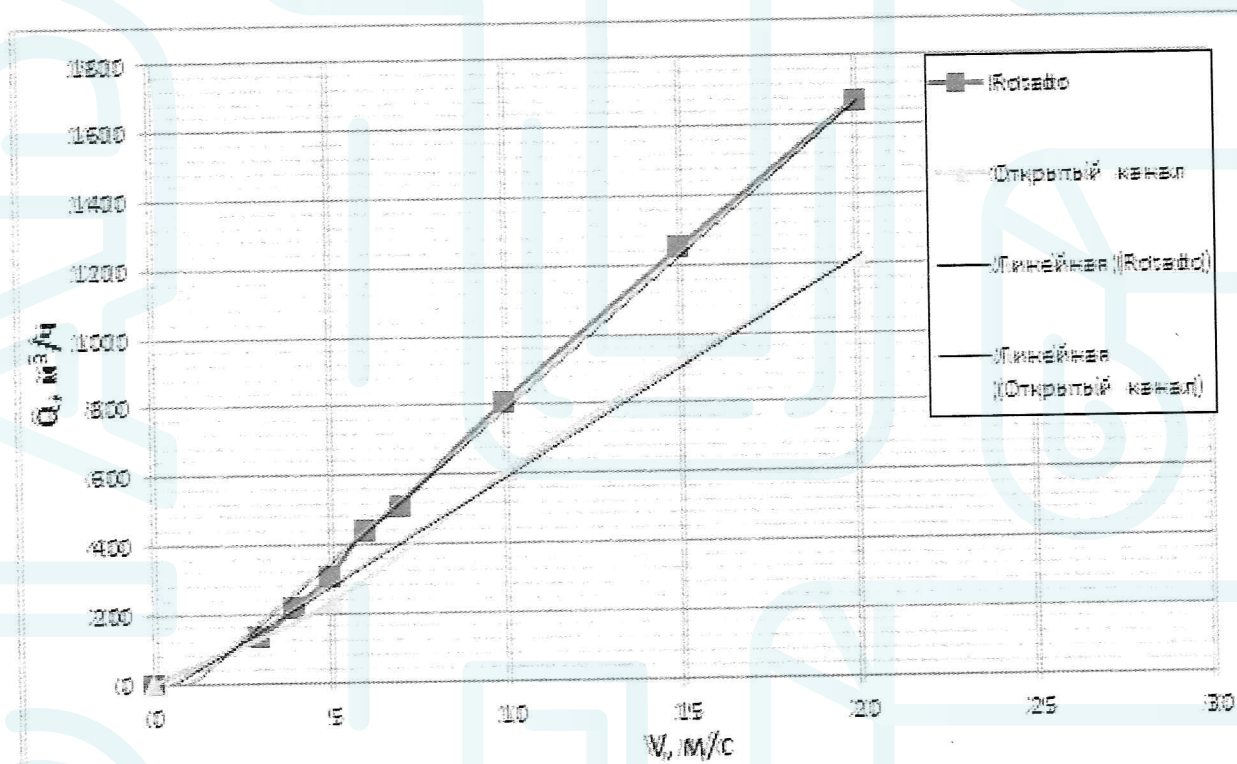


Рисунок А.8 - Rotado типоразмера «315».

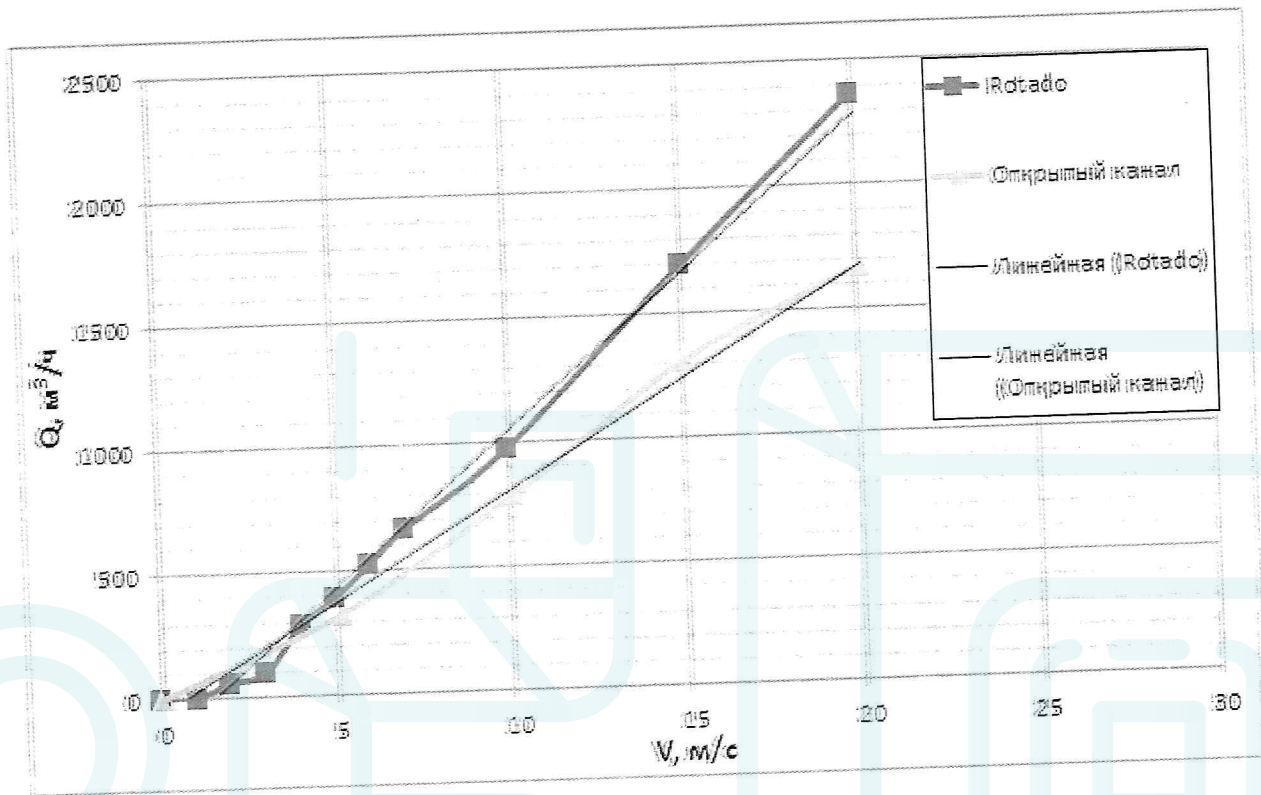


Рисунок А.9 - Rotado типоразмера «355».

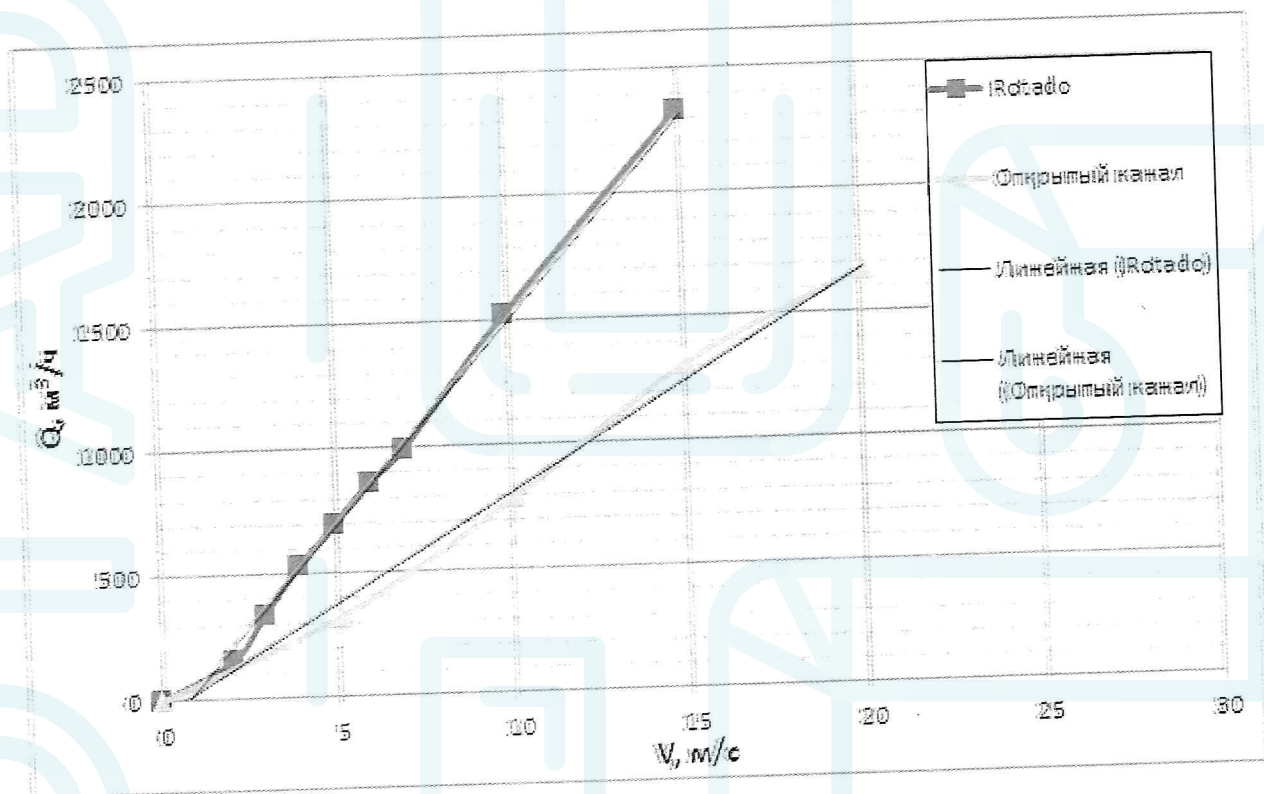


Рисунок А.10 - Rotado типоразмера «400».

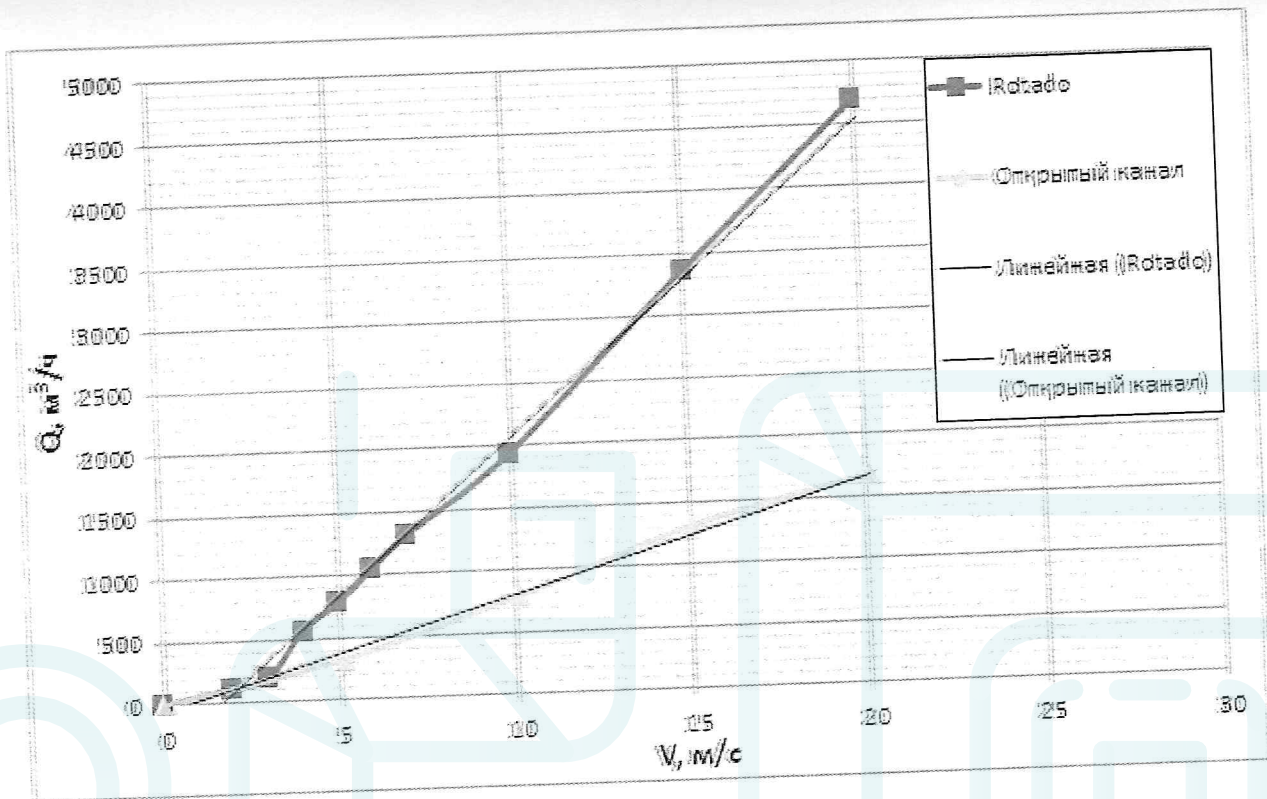


Рисунок А.11 - Rotado типоразмера «500».

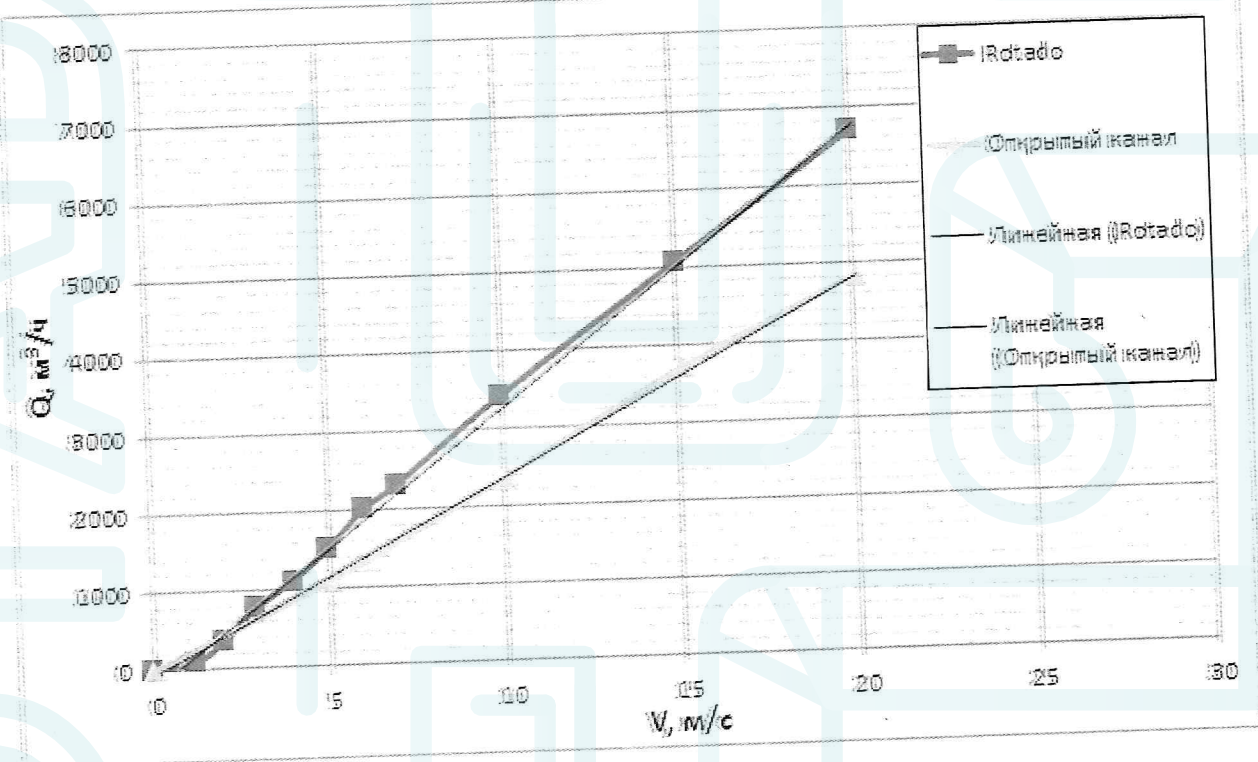


Рисунок А.12 - Rotado типоразмера «600».

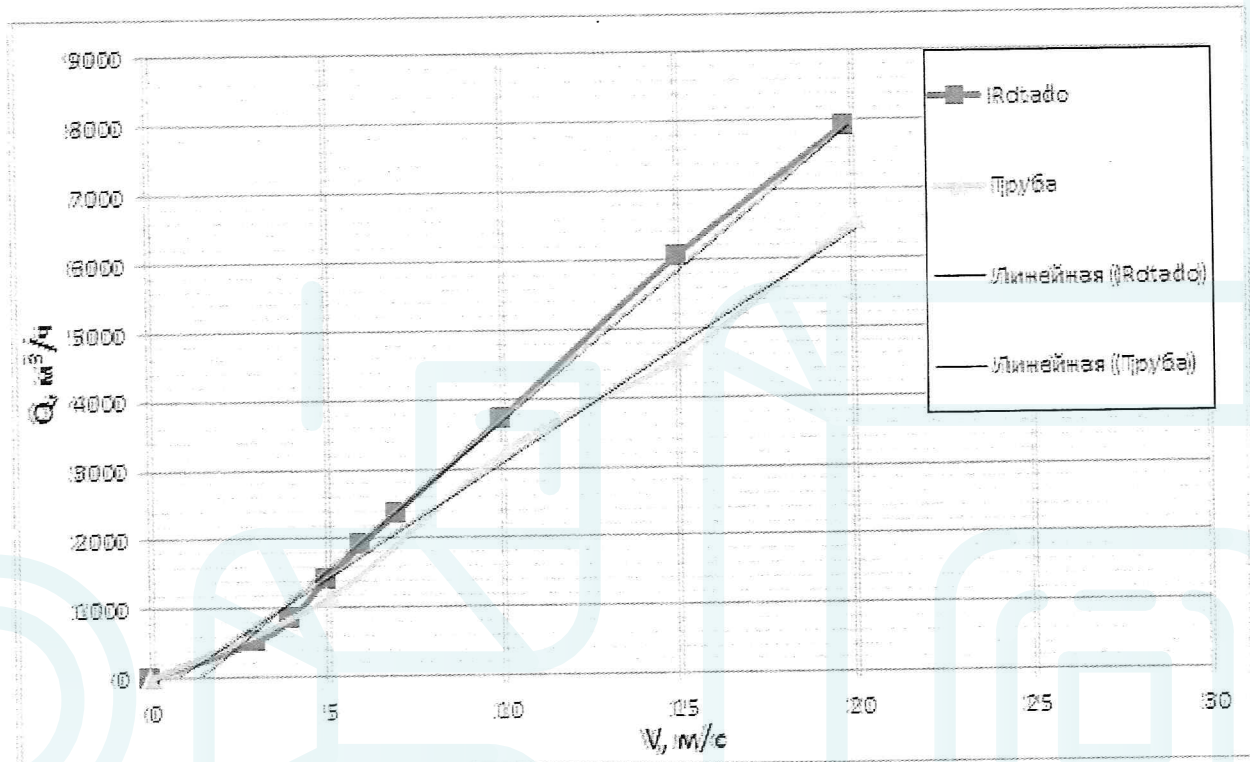


Рисунок А.13 - Rotado типоразмера «680».

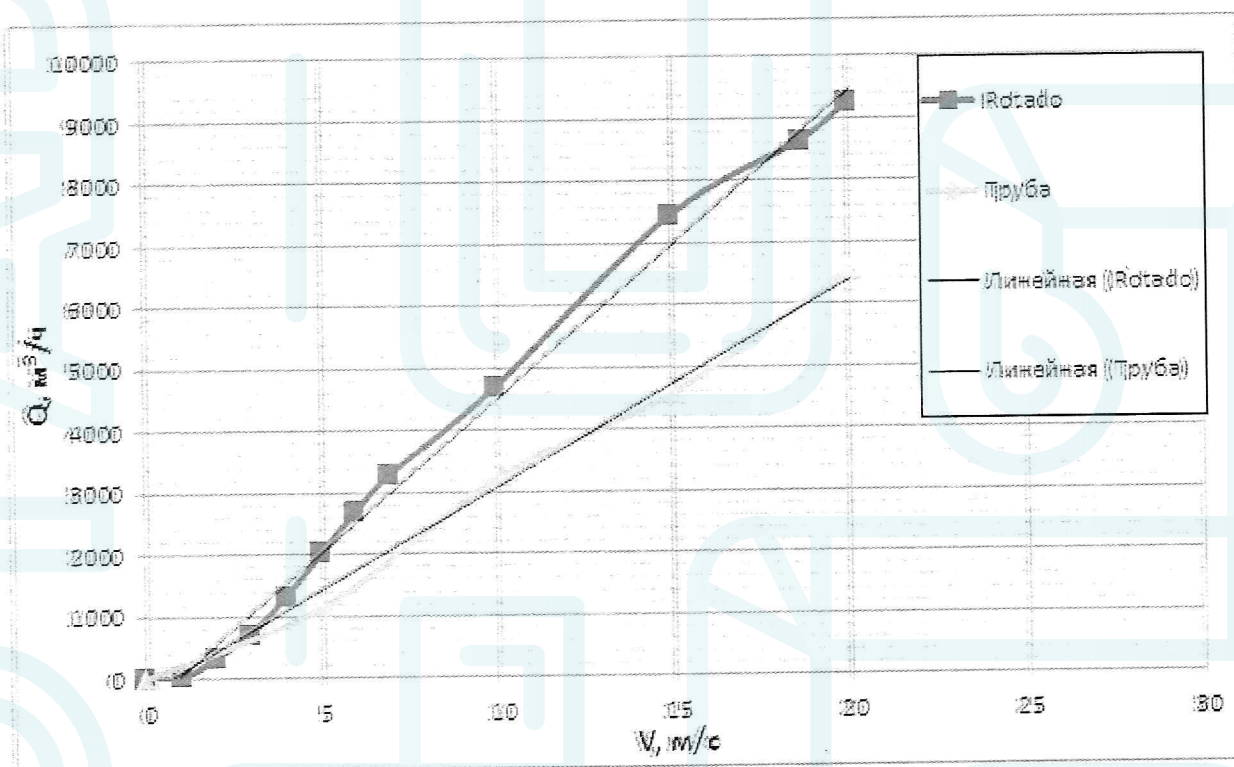


Рисунок А.14 - Rotado типоразмера «800».

Результаты экспериментов в табличной форме



Таблица Б.1 - Rotado типоразмера «100».

Rotado					
V <sub>тр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>тд</sub>	Q <sub>к</sub>	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
1.07	0.104	30.25354	2.940531	0.097196	0.006625
2.014	0.611	56.94451	17.27562	0.303376	0.228659
2.976	1.163	84.14442	32.88305	0.390793	0.828449
3.966	1.582	112.136	44.73	0.398891	1.532918
5.046	2.104	142.6723	59.4892	0.416964	2.711425
5.964	2.564	168.6281	72.49539	0.429913	4.026634
6.95	3.038	196.5066	85.89743	0.437122	5.653034
10.032	4.529	283.6481	128.0545	0.451455	12.5635
14.995	6.701	423.9736	189.4663	0.446882	27.50333
20.063	9.272	567.268	262.1596	0.462144	52.65662
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0.241	0.1871	0.1323	0.000133	0.000103	7.29E-05
0.241	0.1871	0.1323	0.004586	0.00356	0.002517
0.241	0.1871	0.1323	0.016614	0.012898	0.009121
0.241	0.1871	0.1323	0.030742	0.023867	0.016876
0.241	0.1871	0.1323	0.054376	0.042215	0.029851
0.241	0.1871	0.1323	0.080752	0.062692	0.04433
0.241	0.1871	0.1323	0.113369	0.088014	0.062235
0.241	0.1871	0.1323	0.251955	0.195605	0.138314
0.241	0.1871	0.1323	0.551566	0.428208	0.302789
0.241	0.1871	0.1323	1.056002	0.819828	0.579706
Открытый канал					
V <sub>тр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>к</sub>			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
4.982	1.652	46.7092			
9.978	2.556	72.2692			
14.986	4.505	127.3759			
20.06	5.342	151.0415			

Таблица Б.2 - Rotado типоразмера «110».

Rotado					
V <sub>тр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>тд</sub>	Q <sub>к</sub>	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
1,055	0,096	129,132	3,284347	0,025434	0,005645
1,982	0,564	242,5968	19,29554	0,079537	0,194834
3,033	1,079	371,2392	36,91469	0,099436	0,713098
4,03	1,527	493,272	52,24164	0,105908	1,428184
5,015	2	613,836	68,42389	0,111469	2,45

6,016	2,45	736,3584	83,81926	0,113829	3,676531
7,029	2,971	860,3496	101,6437	0,118142	5,40644
10,026	4,555	1227,182	155,8354	0,126986	12,70817
14,964	6,987	1831,594	239,0389	0,130509	29,90113
19,965	8,999	2443,716	307,8733	0,125986	49,60148
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	0,000113	8,79E-05	6,21E-05
0,241	0,1871	0,1323	0,003907	0,003033	0,002145
0,241	0,1871	0,1323	0,014301	0,011102	0,007851
0,241	0,1871	0,1323	0,028642	0,022236	0,015723
0,241	0,1871	0,1323	0,049134	0,038145	0,026972
0,241	0,1871	0,1323	0,073731	0,057241	0,040476
0,241	0,1871	0,1323	0,108423	0,084175	0,05952
0,241	0,1871	0,1323	0,254856	0,197858	0,139906
0,241	0,1871	0,1323	0,599652	0,46554	0,329187
0,241	0,1871	0,1323	0,994733	0,772261	0,546071
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м³/ч			
5	1,634	55,90232			
9,991	3,208	109,7519			
15,039	4,612	157,7855			
20,041	5,819	199,0793			

Таблица Б.3 - Rotado типоразмера «125».

Rotado					
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q
м/с	м/с	м³/ч	м³/ч	б/р	кг/м*с²
1,054	0,144	136,5984	6,361725	0,046572	0,012701
2,015	0,695	261,144	30,70416	0,117576	0,295853
3,005	1,171	389,448	51,7332	0,132837	0,839885
3,991	1,568	517,2336	69,27212	0,133928	1,505907
4,987	2,021	646,3152	89,28504	0,138145	2,50172
5,979	2,474	774,8784	109,298	0,141052	3,748914
7,031	2,932	911,2176	129,5318	0,142152	5,265432
9,98	4,355	1293,408	192,398	0,148753	11,61669
15,018	6,717	1946,333	296,748	0,152465	27,63483
20,104	9,166	2605,478	404,9415	0,155419	51,45953
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	0,000255	0,000198	0,00014
		0,1323	0,005933	0,004606	0,003257

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

0,241	0,1871	0,1323	0,016843	0,013076	0,009246
0,241	0,1871	0,1323	0,0302	0,023446	0,016579
0,241	0,1871	0,1323	0,050171	0,03895	0,027542
0,241	0,1871	0,1323	0,075183	0,058368	0,041272
0,241	0,1871	0,1323	0,105596	0,081979	0,057968
0,241	0,1871	0,1323	0,232967	0,180864	0,12789
0,241	0,1871	0,1323	0,554203	0,430256	0,304237
0,241	0,1871	0,1323	1,031995	0,80119	0,566527
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
4,969	1,715	75,76638			
9,984	3,027	133,7288			
14,973	4,432	195,7998			
20,033	5,764	254,6457			

Таблица Б.4 - Rotado типоразмера «160».

Rotado						
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q	
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>	
1,962	0,152	268,4016	11,00211	0,040991	0,014151	
2,977	0,44	407,2536	31,84821	0,078202	0,11858	
4,072	0,868	557,0496	62,82783	0,112787	0,461472	
5,033	1,338	688,5144	96,84751	0,140662	1,096524	
6,058	1,862	828,7344	134,7758	0,162629	2,123564	
7,055	2,273	965,124	164,525	0,17047	3,164499	
10,041	3,781	1373,609	273,6775	0,19924	8,756276	
15,003	5,986	2052,41	433,2804	0,211108	21,94722	
19,931	7,889	2726,561	571,0239	0,20943	38,11975	
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30	
б/р	б/р	б/р	м	м	м	
0,241	0,1871	0,1323	0,000284	0,00022	0,000156	
0,241	0,1871	0,1323	0,002378	0,001846	0,001305	
0,241	0,1871	0,1323	0,009255	0,007185	0,00508	
0,241	0,1871	0,1323	0,02199	0,017072	0,012072	
0,241	0,1871	0,1323	0,042587	0,033062	0,023379	
0,241	0,1871	0,1323	0,063462	0,049269	0,034839	
0,241	0,1871	0,1323	0,175603	0,136329	0,096399	
0,241	0,1871	0,1323	0,440141	0,341703	0,241621	
0,241	0,1871	0,1323	0,764473	0,593499	0,419667	

Открытый канал					
V <sub>гр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>к</sub>			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
4,969	1,715	75,76638			
9,984	3,027	133,7288			
14,973	4,432	195,7998			
20,033	5,764	254,6457			

Таблица Б.5 - Rotado типоразмера «200».

Rotado						
V <sub>гр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>гд</sub>	Q <sub>к</sub>	Кэф	q	
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>	
1,926	0,101	277,344	11,42283	0,041187	0,006248	
3,05	0,422	439,2	47,72708	0,108668	0,109076	
4,002	0,787	576,288	89,0076	0,15445	0,379364	
5,013	1,267	721,872	143,2943	0,198504	0,98324	
6,049	1,688	871,056	190,9083	0,219169	1,745223	
7,023	1,932	1011,312	218,5041	0,21606	2,286232	
10,014	3,144	1442,016	355,578	0,246584	6,054401	
14,996	4,929	2159,424	557,4568	0,258151	14,88071	
19,932	6,496	2870,208	734,6803	0,255968	25,84628	
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30	
б/р	б/р	б/р	м	м	м	
0,241	0,1871	0,1323	0,000125	9,73E-05	6,88E-05	
0,241	0,1871	0,1323	0,002187	0,001698	0,001201	
0,241	0,1871	0,1323	0,007608	0,005906	0,004176	
0,241	0,1871	0,1323	0,019718	0,015308	0,010825	
0,241	0,1871	0,1323	0,035	0,027172	0,019213	
0,241	0,1871	0,1323	0,045849	0,035595	0,02517	
0,241	0,1871	0,1323	0,121418	0,094263	0,066654	
0,241	0,1871	0,1323	0,298425	0,231683	0,163824	
0,241	0,1871	0,1323	0,518334	0,402409	0,284546	
Открытый канал						
V <sub>гр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>к</sub>				
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч				
4,969	1,715	75,76638				
9,984	3,027	133,7288				
14,973	4,432	195,7998				
20,033	5,764	254,6457				

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

Таблица Б.6 - Rotado типоразмера «250».

Rotado						
Vтр	Vк	QТД	Qк	Кэф	q	
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>	
2,007	0,249	354,6662	44,00193	0,124066	0,037976	
3,033	0,637	535,9753	112,5672	0,210023	0,248534	
4,003	0,854	707,3885	150,9143	0,21334	0,446706	
5,039	1,153	890,4648	203,7519	0,228815	0,814263	
6,029	1,824	1065,412	322,3274	0,302538	2,037773	
6,979	2,188	1233,291	386,6515	0,313512	2,932248	
10,023	3,342	1771,21	590,5801	0,333433	6,84099	
15,041	4,752	2657,964	839,7477	0,315936	13,83117	
20,006	6,517	3535,352	1151,649	0,325752	26,01366	
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30	
б/р	б/р	б/р	м	м	м	
0,241	0,1871	0,1323	0,000762	0,000591	0,000418	
0,241	0,1871	0,1323	0,004984	0,003869	0,002736	
0,241	0,1871	0,1323	0,008958	0,006955	0,004918	
0,241	0,1871	0,1323	0,01633	0,012678	0,008964	
0,241	0,1871	0,1323	0,040867	0,031727	0,022434	
0,241	0,1871	0,1323	0,058805	0,045653	0,032282	
0,241	0,1871	0,1323	0,137193	0,10651	0,075314	
0,241	0,1871	0,1323	0,277377	0,215342	0,15227	
0,241	0,1871	0,1323	0,521691	0,405015	0,286389	
Открытый канал						
Vтр	Vк	Qк				
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч				
4,969	1,715	75,76638				
9,984	3,027	133,7288				
14,973	4,432	195,7998				
20,033	5,764	254,6457				

Таблица Б.7 - Rotado типоразмера «300».

Rotado						
Vтр	Vк	QТД	Qк	Кэф	q	
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>	
1,113	0,054	348,5916	13,74133	0,03942	0,001786	
2,05	0,382	642,06	97,20716	0,151399	0,089378	
2,989	0,83	936,1548	211,2093	0,225614	0,421951	
3,99	1,258	1249,668	320,122	0,256166	0,96932	
5,116	1,869	1602,331	475,6026	0,296819	2,139561	
6,017	2,28	1884,524	580,1893	0,30787	3,18402	

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

7,026	2,463	2200,543	626,7572	0,284819	3,715651
10,094	3,699	3161,441	941,2808	0,297738	8,380593
14,962	5,51	4686,098	1402,124	0,299209	18,59556
20,124	7,261	6302,837	1847,699	0,293154	32,2923
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	3,58E-05	2,78E-05	1,97E-05
0,241	0,1871	0,1323	0,001792	0,001392	0,000984
0,241	0,1871	0,1323	0,008462	0,006569	0,004645
0,241	0,1871	0,1323	0,019439	0,015092	0,010671
0,241	0,1871	0,1323	0,042908	0,033312	0,023555
0,241	0,1871	0,1323	0,063854	0,049573	0,035053
0,241	0,1871	0,1323	0,074516	0,05785	0,040906
0,241	0,1871	0,1323	0,168069	0,13048	0,092263
0,241	0,1871	0,1323	0,372925	0,28952	0,204722
0,241	0,1871	0,1323	0,647606	0,502769	0,355512
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м³/ч			
4,982	1,652	420,3828			
9,978	2,556	650,4228			
14,986	4,505	1146,383			
20,06	5,342	1359,373			

Таблица Б.8 - Rotado типоразмера «315».

Rotado					
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q
м/с	м/с	м³/ч	м³/ч	б/р	кг/м*с²
3,012	0,484	965,0448	135,7872	0,140706	0,143482
3,991	0,782	1278,716	219,3917	0,171572	0,374558
5,01	1,102	1605,204	309,1684	0,192604	0,743822
6,016	1,583	1927,526	444,1139	0,230406	1,534857
7,009	1,834	2245,684	514,5325	0,229121	2,060178
10,025	2,899	3212,01	813,3205	0,253212	5,147573
15,027	4,467	4814,651	1253,226	0,260294	12,22188
20,024	5,964	6415,69	1673,213	0,2608	21,78619
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	0,002877	0,002234	0,00158
0,241	0,1871	0,1323	0,007512	0,005832	0,004124
0,241	0,1871	0,1323	0,014917	0,011581	0,008189
0,241	0,1871	0,1323	0,030781	0,023897	0,016898
0,241	0,1871	0,1323	0,041316	0,032076	0,022681

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

0,241	0,1871	0,1323	0,103232	0,080144	0,056671
0,241	0,1871	0,1323	0,245104	0,190286	0,134553
0,241	0,1871	0,1323	0,436911	0,339196	0,239848
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
5	0,83	232,8582			
10,009	2,174	609,9202			
14,978	3,3	925,8219			
20,037	4,336	1216,474			

Таблица Б.9 - Rotado типоразмера «355».

Rotado						
Vтр	Vк	QГД	Qк	Кэф	q	
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>	
1,023	0,015	486,1296	5,344909	0,010995	0,000138	
1,956	0,17	929,4912	60,57564	0,065171	0,017701	
2,998	0,276	1424,65	98,34633	0,069032	0,046658	
4,006	0,803	1903,651	286,1308	0,150306	0,394946	
5,001	1,109	2376,475	395,167	0,166283	0,753302	
6,006	1,484	2854,051	528,7897	0,185277	1,348882	
7	1,859	3326,4	662,4124	0,199138	2,116727	
10,008	2,754	4755,802	981,3254	0,206343	4,645516	
15,038	4,764	7146,058	1697,543	0,23755	13,90111	
19,964	6,631	9486,893	2362,806	0,24906	26,93172	
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30	
б/р	б/р	б/р	м	м	м	
0,241	0,1871	0,1323	2,76E-06	2,15E-06	1,52E-06	
0,241	0,1871	0,1323	0,000355	0,000276	0,000195	
0,241	0,1871	0,1323	0,000936	0,000726	0,000514	
0,241	0,1871	0,1323	0,00792	0,006149	0,004348	
0,241	0,1871	0,1323	0,015107	0,011728	0,008293	
0,241	0,1871	0,1323	0,027051	0,021001	0,01485	
0,241	0,1871	0,1323	0,04245	0,032956	0,023303	
0,241	0,1871	0,1323	0,093164	0,072328	0,051143	
0,241	0,1871	0,1323	0,27878	0,216431	0,15304	
0,241	0,1871	0,1323	0,540102	0,419309	0,296496	
Открытый канал						
Vтр	Vк	Qк				
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч				
5,037	0,898	319,9819				
10,045	2,204	785,3454				
14,977	3,67	1307,721				
20,014	4,683	1668,681				

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

Таблица Б.10 - Rotado типоразмера «400».

Rotado					
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
2,064	0,346	1344,902	156,5267	0,116385	0,073326
2,974	0,739	1937,858	334,3157	0,172518	0,334499
3,983	1,18	2595,323	533,8194	0,205685	0,852845
5,004	1,546	3260,606	699,3939	0,214498	1,463946
6,032	1,914	3930,451	865,8732	0,220299	2,24383
7,019	2,197	4573,58	993,8994	0,217313	2,956421
9,949	3,373	6482,768	1525,909	0,235379	6,968492
14,967	5,152	9752,497	2330,71	0,238986	16,25765
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	0,001471	0,001142	0,000807
0,241	0,1871	0,1323	0,006708	0,005208	0,003683
0,241	0,1871	0,1323	0,017103	0,013278	0,009389
0,241	0,1871	0,1323	0,029359	0,022793	0,016117
0,241	0,1871	0,1323	0,044999	0,034935	0,024703
0,241	0,1871	0,1323	0,05929	0,046029	0,032548
0,241	0,1871	0,1323	0,13975	0,108495	0,076717
0,241	0,1871	0,1323	0,326039	0,253121	0,178983
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
5,037	0,898	319,9819			
10,045	2,204	785,3454			
14,977	3,67	1307,721			
20,014	4,683	1668,681			

Таблица Б.11 - Rotado типоразмера «500».

Rotado					
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
1,956	0,17	1513,944	120,1659	0,079373	0,017701
2,998	0,276	2320,452	195,0929	0,084075	0,046658
4,006	0,803	3100,644	567,6073	0,183061	0,394946
5,001	1,109	3870,774	783,9059	0,202519	0,753302
6,006	1,484	4648,644	1048,978	0,225652	1,348882
7	1,859	5418	1314,05	0,242534	2,116727
10,008	2,754	7746,192	1946,688	0,251309	4,645516
15,038	4,764	11639,41	3367,473	0,289316	13,90111

88007002460

<http://www.rotado.ru/>



19,964	6,631	15452,14	4687,178	0,303335	26,93172
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	2,76E-06	2,15E-06	1,52E-06
0,241	0,1871	0,1323	0,000355	0,000276	0,000195
0,241	0,1871	0,1323	0,000936	0,000726	0,000514
0,241	0,1871	0,1323	0,00792	0,006149	0,004348
0,241	0,1871	0,1323	0,015107	0,011728	0,008293
0,241	0,1871	0,1323	0,027051	0,021001	0,01485
0,241	0,1871	0,1323	0,04245	0,032956	0,023303
0,241	0,1871	0,1323	0,093164	0,072328	0,051143
0,241	0,1871	0,1323	0,27878	0,216431	0,15304
Открытый канал					
V <sub>тр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>к</sub>			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
5,037	0,898	319,9819			
10,045	2,204	785,3454			
14,977	3,67	1307,721			
20,014	4,683	1668,681			

Таблица Б.12 - Rotado типоразмера «600».

Rotado					
V <sub>тр</sub>	V <sub>к</sub>	Q <sub>тд</sub>	Q <sub>к</sub>	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
1,231	0,101	1090,174	102,8055	0,094302	0,006248
2,049	0,368	1814,594	374,5784	0,206425	0,082947
2,972	0,771	2632,003	784,7824	0,298169	0,364095
4,008	1,095	3549,485	1114,574	0,31401	0,734403
5,031	1,498	4455,454	1524,778	0,342227	1,374452
6,042	1,978	5350,795	2013,359	0,376273	2,396396
7,024	2,285	6220,454	2325,847	0,373903	3,198
9,986	3,353	8843,602	3412,938	0,385922	6,886098
15,016	4,974	13298,17	5062,915	0,380723	15,15366
20,05	6,57	17756,28	6687,445	0,376624	26,4385
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	0,000125	9,73E-05	6,88E-05
0,241	0,1871	0,1323	0,001663	0,001291	0,000913
0,241	0,1871	0,1323	0,007302	0,005669	0,004008
0,241	0,1871	0,1323	0,014728	0,011434	0,008085
0,241	0,1871	0,1323	0,027564	0,021399	0,015132
0,241	0,1871	0,1323	0,048059	0,03731	0,026382
0,241	0,1871	0,1323	0,064134	0,049791	0,035207

0,241	0,1871	0,1323	0,138097	0,107212	0,07581
0,241	0,1871	0,1323	0,303899	0,235932	0,166829
0,241	0,1871	0,1323	0,530211	0,41163	0,291066
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
4,985	1,07	1089,127			
10,035	2,334	2375,723			
15,054	3,639	3704,051			
20,019	4,737	4821,679			

Таблица Б.13 Rotado типоразмера «680».

Rotado					
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	б/р	кг/м*с <sup>2</sup>
0,889	0,047	755,2944	61,44804	0,081356	0,001353
1,976	0,096	1678,81	125,5109	0,074762	0,005645
2,98	0,402	2531,808	525,5769	0,20759	0,098982
4,004	0,65	3401,798	849,8134	0,249813	0,258781
4,983	1,085	4233,557	1418,535	0,335069	0,72105
6,004	1,463	5100,998	1912,734	0,374972	1,310976
7,005	1,818	5951,448	2376,863	0,399376	2,024388
10,005	2,854	8500,248	3731,334	0,438968	4,989006
15,02	4,635	12760,99	6059,823	0,474871	13,15848
19,817	6,068	16836,52	7933,335	0,471198	22,55263
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30
б/р	б/р	б/р	м	м	м
0,241	0,1871	0,1323	2,71E-05	2,11E-05	1,49E-05
0,241	0,1871	0,1323	0,000113	8,79E-05	6,21E-05
0,241	0,1871	0,1323	0,001985	0,001541	0,00109
0,241	0,1871	0,1323	0,00519	0,004029	0,002849
0,241	0,1871	0,1323	0,01446	0,011226	0,007938
0,241	0,1871	0,1323	0,026291	0,020411	0,014433
0,241	0,1871	0,1323	0,040598	0,031518	0,022287
0,241	0,1871	0,1323	0,100052	0,077675	0,054925
0,241	0,1871	0,1323	0,263887	0,204869	0,144864
0,241	0,1871	0,1323	0,452282	0,351129	0,248286
Открытый канал					
Vтр	Vк	Qк			
м/с	м/с	м <sup>3</sup> /ч			
5,008	0,879	1149,209			
10,045	2,492	3258,054			
14,983	3,497	4571,996			

88007002460

<http://www.rotado.ru/>

19,962

5,008

6547,485

Таблица Б.14 - Rotado типоразмера «800».

Rotado						
Vтр	Vк	Qтд	Qк	Кэф	q	
м/с	м/с	м³/ч	м³/ч	б/р	кг/м*с²	
1,073	0,021	1062,27	38,0007	0,035773	0,00027	
2,01	0,185	1989,9	334,7681	0,168234	0,020963	
2,979	0,39	2949,21	705,7274	0,239294	0,093161	
4,013	0,735	3972,87	1330,025	0,334777	0,330888	
5,014	1,122	4963,86	2030,323	0,409021	0,771066	
6,002	1,493	5941,98	2701,669	0,454675	1,365293	
6,983	1,824	6913,17	3300,633	0,477441	2,037773	
9,996	2,6	9896,04	4704,849	0,475427	4,1405	
14,967	4,114	14817,33	7444,519	0,50242	10,36656	
18,689	4,778	18502,11	8646,065	0,467302	13,98294	
20,031	5,112	19830,69	9250,457	0,466472	16,00618	
ξ90	ξ45	ξ30	h90	h45	h30	
б/р	б/р	б/р	м	м	м	
0,241	0,1871	0,1323	5,42E-06	4,21E-06	2,97E-06	
0,241	0,1871	0,1323	0,00042	0,000326	0,000231	
0,241	0,1871	0,1323	0,001868	0,00145	0,001026	
0,241	0,1871	0,1323	0,006636	0,005152	0,003643	
0,241	0,1871	0,1323	0,015463	0,012005	0,008489	
0,241	0,1871	0,1323	0,02738	0,021257	0,015031	
0,241	0,1871	0,1323	0,040867	0,031727	0,022434	
0,241	0,1871	0,1323	0,083036	0,064465	0,045583	
0,241	0,1871	0,1323	0,207896	0,1614	0,114127	
0,241	0,1871	0,1323	0,280421	0,217705	0,153941	
0,241	0,1871	0,1323	0,320996	0,249205	0,176215	
Открытый канал						
Vтр	Vк	Qк				
м/с	м/с	м³/ч				
4,975	1,104	1997,751				
10,04	2,702	4889,424				
15,034	4,082	7386,613				
20,029	5,249	9498,367				

88007002460  
<http://www.rotado.ru/>