

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ

П. Ф. Янчилин¹, Ю. В. Каперейко²

¹Старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, БрГТУ, Брест, Беларусь, email: tgv_bstu@tut.by

²Преподаватель-стажер, БрГТУ, Брест, Беларусь, email: yulya.kapereyko@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлены результаты по исследованию особенностей аэродинамического расчета разветвленной приточно-вытяжной системы кондиционирования в компьютерной программе MagiCAD Revit и установлены различия в результатах расчета, которые влияют на строительство и эксплуатацию этой системы.

Ключевые слова: потери давления, воздуховоды, воздухораспределитель, расход воздуха, диаметр воздуховода, аэродинамический расчёт.

ANALYSIS OF FEATURES OF AERODYNAMIC CALCULATION OF AN AIR CONDITIONING SYSTEM USING SPECIALIZED PROGRAMS

P. Yanchilin, Y. Kapereyko

Abstract

This article presents the results of a study of the features of aerodynamic calculations in the MagiCAD Revit computer program and identifies differences in the calculation results that affect the construction and operation of this system.

Keywords: pressure loss, air ducts, air distributor, air flow, air duct diameter, aerodynamic calculation.

Введение. Вентиляция – обмен воздуха в помещениях для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ с целью обеспечения допустимых параметров микроклимата и чистоты воздуха в рабочей или обслуживаемой зоне помещения. Также вентиляцией называют систему воздуховодов и каналов, обеспечивающих требуемый воздухообмен в помещении. Микроклимат – совокупность факторов, определяющих метеорологическую обстановку в помещении. К этим факторам относятся: температура воздуха, относительная влажность, скорость движения (подвижность) воздуха в рабочей или обслуживаемой зоне помещения.

Поддержание необходимого качества воздуха в помещении является главной задачей систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Приточные системы вентиляции подают чистый воздух в помещение, вытяжные – удаляют загрязненный воздух из помещения. Системы вентиляции могут быть с механическим побуждением движения воздуха с помощью вентиляторов,

эжекторов и с естественным побуждением движения воздуха за счет действия гравитационных сил и воздействия ветра.

Системы вентиляции являются самыми давними инженерными коммуникациями, однако их расчет все еще является не до конца исследованным и разработанным. В настоящее время стали применяться специальные программы для быстрого и удобного расчета систем вентиляции и кондиционирования. Одной из таких программ является MagiCAD Revit.

Материалы и методы. Методологическая основа исследования состояла из сбора данных, комплексного анализа существующих способов расчета. Исследование проводилось посредством расчетов и моделирования на примере модели системы кондиционирования.

Результаты и обсуждение. Аэродинамический расчет воздуховодов сводится к определению их диаметров d , m , а также потерь давления на отдельных участках при заданном расходе воздуха L , $m^3/ч$, и скорости V , $m/с$, на участке (рисунок 1).

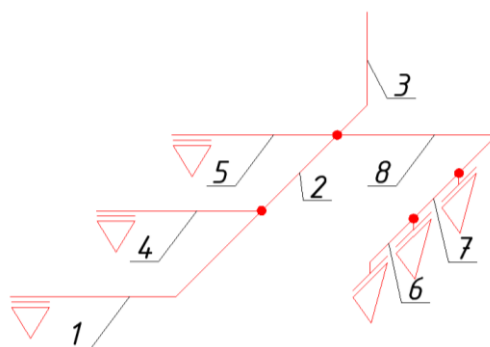


Рисунок 1 – Пример аксонометрической схемы системы вентиляции

Аэродинамический расчет воздуховодов начинается с вычерчивания аксонометрической схемы, проставления номеров участков, их нагрузок L , $m^3/ч$, и длин l , m . Определяется направление аэродинамического расчета – от наиболее удаленного и нагруженного участка до вентилятора. Отметим, что в приточных системах расчет ведется обычно против движения воздуха, а в вытяжных – вдоль этого движения.

Расчет начинают с удаленного участка, рассчитывается его диаметр d , m , или площадь поперечного сечения прямоугольного воздуховода F , m^2 .

Участок – это отрезок воздуховода, характеризующийся постоянным расходом воздуха. Границами между отдельными участками служат тройники или решетки.

$$F = \frac{L}{3600 \cdot v_{рек}} \quad (1)$$

Рекомендуемая скорость воздуха в воздуховодах общественных зданий (механическое побуждение):

- магистрали – 8–12 $m/с$;
- ответвления – не менее 5 $m/с$.

Рекомендуемая скорость воздуха в воздуховодах производственных зданий:

- магистрали – 10–16 $m/с$;
- ответвления – не менее 5 $m/с$.

Воздуховоды, по которым транспортируется незапыленный воздух, обычно рассчитываются по методу удельной потери давления по формуле

$$P = R \cdot l + Z, \quad (2)$$

где P – потери давления на участке воздуховода, Па;

R – потери на трение на 1 м длины, Па;

l – длина участка, м;

Z – потери давления в местных сопротивлениях, Па.

Коэффициенты местных сопротивлений подбираем исходя из таблиц. Местными сопротивлениями являются: отводы, тройники, крестовины, решетки (воздухораспределительные устройства). При расчете тройника на проходе или на ответвлении рассчитываются такие величины, как

$$\xi_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}}}{f_c} = \frac{d_{\text{п}}^2}{d_c^2}, \quad \xi_o = \frac{f_o}{f_c} = \frac{d_o^2}{d_c^2}, \quad \frac{L_{\text{п}}}{L_c}, \quad (3)$$

$f_{\text{п}}, f_o, f_c$ – площадь прохода, ответвления и ствола тройника;

L_o, L_c – расход воздуха в ответвлении и стволе тройника;

$\xi_{\text{п}}, \xi_o$ – коэффициент сопротивления прохода и ответвления тройника, отнесенные соответственно к скорости воздуха в проходе и ответвлении.

Исходя из полученных соотношений, находим из таблиц необходимые коэффициенты. Невязка ответвлений с главным направлением не должна превышать 10 %.

В случае же если воздуховоды имеют не круглую форму, а прямоугольную, то для них используются те же формулы, однако вводится величина эквивалентного диаметра $d_{\text{ЭКВ}}$, м, которая находится по формуле

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{2ab}{a+b}, \quad (4)$$

где a и b – длины сторон воздуховода, м.

Для точности расчетов также рекомендуется учитывать поправочный коэффициент абсолютной шероховатости n , который учитывает изменение радиуса (размеров) воздуховода вследствие неровностей на его внутренней поверхности.

Аэродинамический расчет заканчивается подбором вентиляционного оборудования по требуемому расходу и потерям давления по главному направлению. Рекомендуется подбирать установку с запасом, т. е. умножить критерии для подбора на коэффициент 1,1–1,2.

Таким образом, аэродинамический расчёт с помощью номограмм и таблиц является удобным вариантом для проектирования систем вентиляции и кондиционирования, так как позволяет непосредственно контролировать различные параметры, такие как размеры воздуховодов, форма поперечного сечения, скоростной режим по ходу движения воздуха, потери по длине, при необходимости позволяет изменять конфигурацию вентиляционной системы в ходе самого расчета.

По мере развития IT-технологий появляется множество программ для автоматизированного расчета различных инженерных систем, конструкций, схем. Одной из таких программ является MagiCAD, которая позволяет

производить автоматический расчет систем вентиляции и кондиционирования, балансировку системы воздуховодов. Однако насколько такой метод расчета является эффективным?

Для сравнения двух методов расчета, автоматического и «вручную», возьмем модель здания с разветвленной приточно-вытяжной системой кондиционирования (рисунок 2). Первый расчет производим в программе MagiCAD Revit, второй – с помощью таблиц и номограмм, по максимально допустимым скоростям: 5–8 м/с в ответвлениях, 8–12 м/с в магистральных воздуховодах.

По результатам проведенных расчетов получается, что в приточной системе кондиционирования:

1. При автоматическом расчете в программе MagiCAD Revit потери давления составляют $\Delta P = 269,1$ Па при расходе воздуха 8976 м³/ч (на основании отчета из MagiCAD Revit).

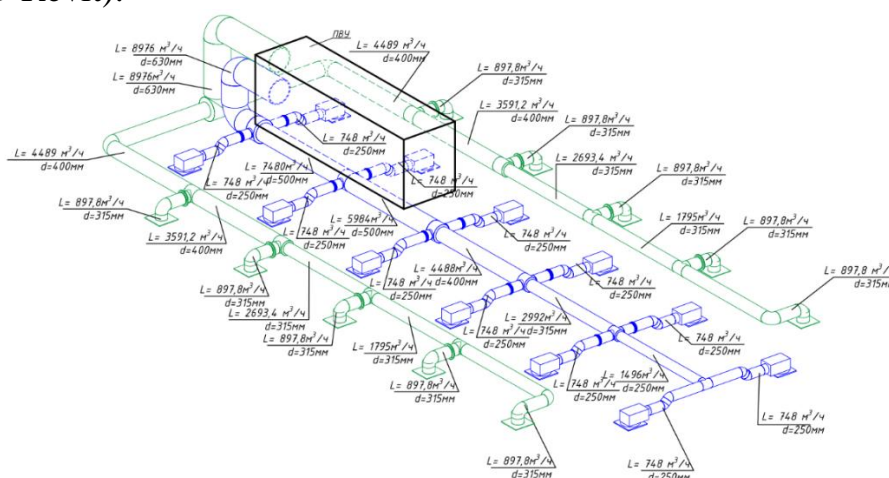


Рисунок 2 – 3D модель системы кондиционирования помещения, выполненная и рассчитанная в программе MagiCAD Revit

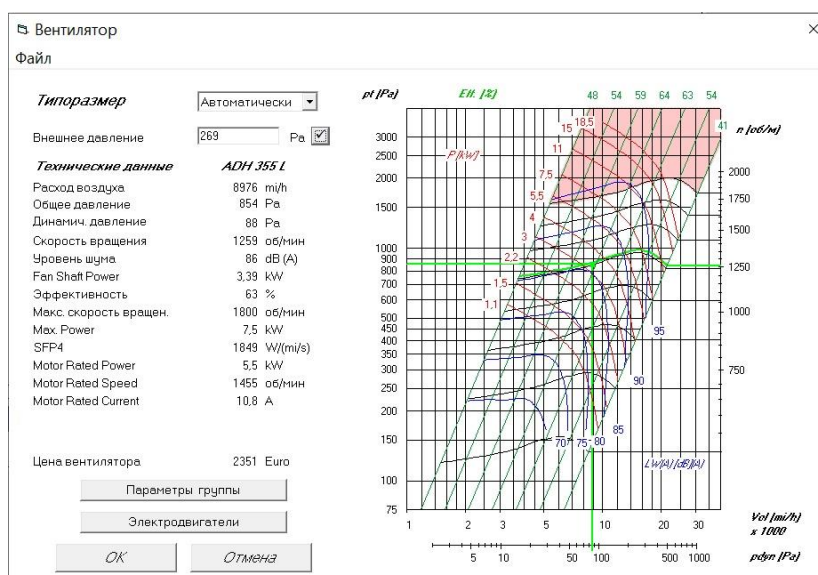


Рисунок 3 – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной в программе MagiCAD Revit

2. При расчете с помощью номограмм потери давления по главному направлению составляют 275,77 Па при расходе воздуха 8976 м³/ч (таблица 1). Ниже приведен аэродинамический расчет только главного направления системы кондиционирования, так как результатом такого расчета является подбор вентиляционного оборудования, которое подбирается исходя из значений максимальных потерь давления по главному направлению, т. е. в данном случае можно не рассматривать расчет ответвлений.

Таблица 1 – Аэродинамический расчет главного направления системы кондиционирования.

№	L, м ³ /ч	l, м	d, мм	v, м/с	R, Па	R*l, Па*м	P _л , Па	Σξ	Z=P _л *Σξ	xP _{впр} , Па	R*l+Z, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Главное направление (1-8)											
ВР			250							58	58
1	748	0,805	200	6,9	4,25	3,421	28,566	0,25	7,142		10,563
2	748	1	200	6,6	2,6	2,600	26,136	1,15	30,056		32,656
3	1496	3,6	250	8,3	3,1	11,160	41,334	0,35	14,467		25,627
4	2992	3,6	315	10,3	3,5	12,600	63,654	0,36	22,915		35,515
5	4488	3,6	400	9,7	2,3	8,280	56,454	0,37	20,888		29,168
6	5984	3,6	500	8,3	1,3	4,680	41,334	0,15	6,200		10,880
7	7480	3,6	500	10,2	1,9	6,840	62,424	0,33	20,600		27,440
8	8976	3,665	550	10,5	1,7	6,231	66,150	0,6	39,690		45,921
Суммарные потери давления, Па:											275,770

Расхождение значений потерь давления по отношению к автоматическому расчету составляет 6,67 Па или $\delta = \frac{275,8 - 269,1}{269,1} = 2,5\%$.

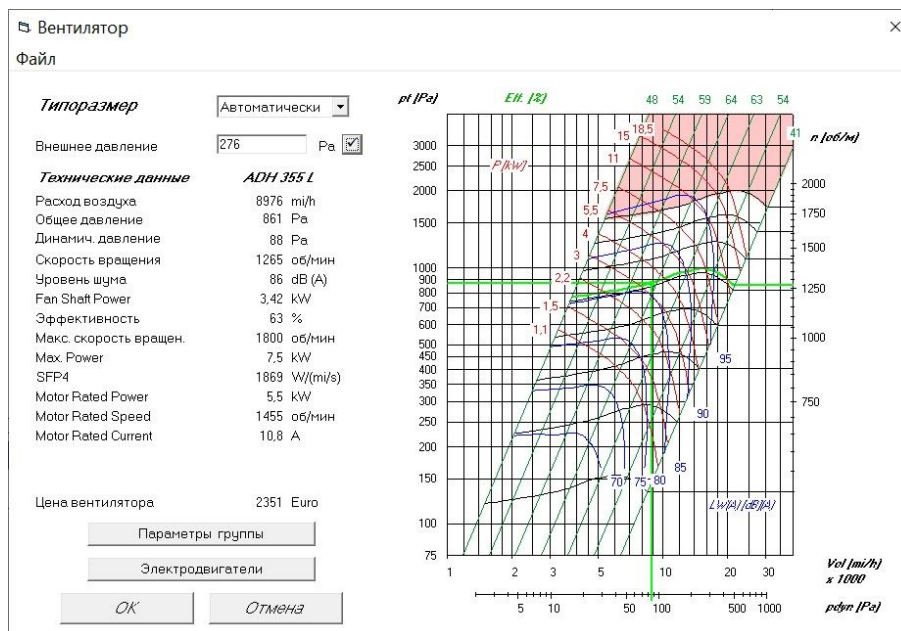


Рисунок 4 – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной по номограммам и таблицам

Таким образом, отклонение от автоматизированного расчета небольшое, однако главным отличием служат подобранные диаметры воздуховодов (таблица 2). Вентиляционное оборудование для обоих вариантов, как видно из рисунка 3 и 4, является одинаковым.

Таблица 2 – Диаметры воздуховодов, подобранные по программе MagiCAD Revit и по номограммам

№ участка	D, мм, подобранные в MagiCAD Revit	D, мм, подобранные по номограммам
1	250	200
2	250	200
3	250	250
4	315	315
5	400	400
6	500	500
7	500	500
8	630	550

Заметно, что диаметры на начальном и конечном участках отличаются. Из-за того, что диаметры, рассчитанные по номограммам, имеют меньший размер, это приводит к увеличению потерь давления. Рассчитаем по номограммам систему с такими же диаметрами, подобранными в программе MagiCAD Revit (т. е. изменим диаметры на участках 1, 2, 8) (таблица 3).

Таблица 3 – Аэродинамический расчет главного направления системы кондиционирования (с пересчетом участков 1, 2, 8)

№	L, м ³ /ч	l, м	d, мм	v, м/с	R, Па	R*l, Па*м	P _д , Па	Σξ	Z=P _д *Σξ	хP _{вп} , Па	R*1+Z, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Главное направление (1-8)											
ВР			250							58	58
1	748	0,805	250	4,3	1,36	1,095	11,094	0,25	2,774		3,868
2	748	1	250	4,25	0,95	0,950	10,838	1,15	12,463		13,413
3	1496	3,6	250	8,3	3,1	11,160	41,334	0,35	14,467		25,627
4	2992	3,6	315	10,3	3,5	12,600	63,654	0,36	22,915		35,515
5	4488	3,6	400	9,7	2,3	8,280	56,454	0,37	20,888		29,168
6	5984	3,6	500	8,3	1,3	4,680	41,334	0,15	6,200		10,880
7	7480	3,6	500	10,2	1,9	6,840	62,424	0,4	24,970		31,810
8	8976	3,665	630	7,9	0,89	3,262	37,446	0,6	22,468		25,729
							Суммарные потери давления, Па:				234,011

В данном случае расхождение значений потерь давления по отношению к автоматическому расчету составляет 35,09 Па или $\delta = \frac{269,1-234,011}{269,1} = 13\%$.

Вентилятор для такой системы представлен на рисунке 5.

Разница в потерях давления не является большой, однако при применении больших по размерам воздуховодов появляются дополнительные затраты на материал и монтаж системы. При применении больших воздуховодов не соблюдаются также пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях

(не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.

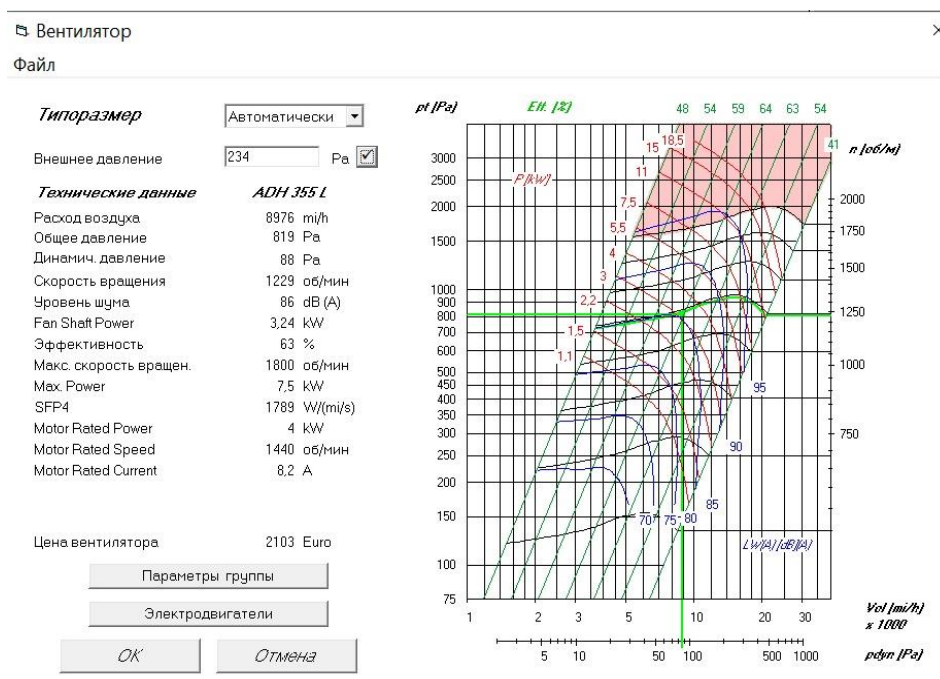


Рисунок 5 – Технические данные вентилятора, подобранного для системы кондиционирования, рассчитанной по номограммам и таблицам (с пересчетом участков 1, 2, 8)

Одной из важных деталей автоматизированного расчета системы кондиционирования (вентиляции) является то, что программа производит увязку ответвлений только при наличии в них регулирующей арматуры, что не всегда может быть обязательным при расчете по номограммам и таблицам (при невязке ответвлений с главным направлением менее 10 %). Добавление запорной арматуры ведет к удорожанию системы кондиционирования.

Таким образом, различия в расчете с помощью программы и по номограммам и таблицам не существенные, но все же они имеют место быть. Расхождение значений потерь давления между автоматическим и «стандартным» составляет 2,4 %, а при пересчете на диаметры, подобранные в программе – 13 %. Небольшая разница может привести к удорожанию системы, что является нежелательным результатом аэродинамического расчета.

На основании вышеперечисленного можно сделать вывод, что расчет в программах является альтернативой расчету по номограммам и таблицам, однако стоит учитывать некоторую погрешность автоматизированных расчётов. На примере системы кондиционирования одного помещения можно сказать, что метод расчета по номограммам и таблицам является более надежным, так как все параметры воздуховодов контролируются непосредственно человеком, а именно, такие как скорость и ее возрастание по ходу движения расчета участков

воздуховодов, потери в местных сопротивлениях, форма поперечного сечения и размер воздуховодов.

По полученным результатам можем составить предварительный расчет стоимости материалов и оборудования системы кондиционирования для двух вариантов.

При расчете с помощью номограмм потери давления по главному направлению составляют 275,77 Па при расходе воздуха 8976 м³/ч.

При автоматическом расчете в программе MagiCAD Revit потери давления составляют $\Delta P = 269,1$ Па при расходе воздуха 8976 м³/ч (на основании отчета из MagiCAD Revit).

На данный момент в Беларуси средняя стоимость вентиляционного оборудования составляет:

Таблица 4 – Средняя стоимость воздуховодов и фасонных частей

Диаметр воздуховода	Средняя стоимость прямолинейного участка, бел. руб. за 1 м.п.	Средняя стоимость фасонного изделия (отводы, тройники, крестовины, редукция), бел. руб. за 1 шт.
200	22,0	16,0
250	27,0	21,0
315	34,0	28,0
400	44,0	38,0
500	77,0	71,0
550	87,0	81,0
630	98,0	92,0

Таким образом, можем рассчитать приблизительную стоимость строительства всей системы кондиционирования на основании двух расчетов, с учетом ответвлений, регулирующей арматуры (воздушных клапанов). Воздухораспределители в расчете учитывать не будем, так как они остаются неизменными в обоих расчетах. Стоимость монтажных работ также принимаем одинаковой для обоих случаев.

Небольшое различие в расчетах аэродинамики приводит к заметному различию стоимости самой системы кондиционирования, а именно на 148,2 бел. руб. или 3,9 %. При этом несколько увеличенные диаметры воздуховодов приводят к нарушению скоростного режима в системе кондиционирования, вследствие чего не соблюдаются пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях (не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.

Одним из критериев эффективной системы кондиционирования так же являются затраты на ее эксплуатацию. В данном случае для обеих систем кондиционирования подходит одна и та же установка, где расход и потери давления практически одинаковы.

Таблица 5 – Приблизительная стоимость строительства системы кондиционирования по расчетам, сделанным по номограммам и таблицам

Диаметр d, мм	Название изделия	Количество, шт. (м.п.)	Стоимость одной единицы изделия за шт. (м.п.), бел. руб.	Стоимость, бел. руб.
1	2	3	4	5
200	гофрированный воздуховод	9,66	9,36	90,42
200	стальной навивной воздуховод	12,00	22,00	264,00
250	стальной навивной воздуховод	3,60	27,00	97,20
315	стальной навивной воздуховод	3,60	34,00	122,40
400	стальной навивной воздуховод	3,60	44,00	158,40
500	стальной навивной воздуховод	7,20	77,00	554,40
550	стальной навивной воздуховод	3,67	87,00	318,86
200	фасонное изделие	12	16,00	192,00
250	фасонное изделие	3	21,00	63,00
315	фасонное изделие	4	28,00	112,00
400	фасонное изделие	4	38,00	152,00
500	фасонное изделие	7	71,00	497,00
550	фасонное изделие	6	81,00	486,00
200	воздушный клапан	8	67,23	537,84
Суммарная стоимость, бел. руб.:				3645,51

Таким образом, можно сделать вывод, что использование программ является эффективным и удобным способом расчёта, но следует принимать во внимание некоторые особенности проектирования систем вентиляции. Для большей эффективности стоит проводить расчеты с использованием различных методов аэродинамического расчета.

Заключение. Различия в расчете с помощью программы MagiCAD Revit и по номограммам и таблицам не существенные, но все же они имеют место быть. Расхождение значений потерь давления между автоматическим и «стандартным» составляет 2,4 %, а при пересчете на диаметры, подобранные в программе – 13 %. Небольшая разница может привести к удорожанию системы, что является нежелательным результатом аэродинамического расчета. Расчет в программах является альтернативой расчету по номограммам и таблицам, однако стоит учитывать некоторую погрешность автоматизированных расчетов.

Небольшое различие в расчетах аэродинамики приводит к заметному различию стоимости самой системы кондиционирования, а именно $\delta = 3,9 \%$.

При этом несколько увеличенные диаметры воздухопроводов приводят к нарушению скоростного режима в системе кондиционирования, вследствие чего не соблюдаются пределы рекомендуемых скоростей в ответвлениях (не менее 5 м/с). С учетом многолетнего опыта эксплуатации объектов с разветвленной системой кондиционирования скоростной режим должен быть согласован, иначе это может повлиять на эффективность эксплуатации системы кондиционирования.

Таблица 6 – Приблизительная стоимость строительства системы кондиционирования по расчетам, сделанным в программе MagiCAD Revit

Диаметр d, мм	Название изделия	Количество, шт. (м.п.)	Стоимость одной единицы изделия за шт. (м.п.), бел. руб.	Стоимость, бел. руб.
1	2	3	4	5
250	гофрированный воздухопровод	9,66	13,44	129,83
250	стальной навивной воздухопровод	15,60	27,00	421,20
315	стальной навивной воздухопровод	3,60	34,00	122,40
400	стальной навивной воздухопровод	3,60	44,00	158,40
500	стальной навивной воздухопровод	7,20	77,00	554,40
630	стальной навивной воздухопровод	3,67	98,00	359,17
250	фасонное изделие	1	21,00	21,00
315	фасонное изделие	4	28,00	112,00
400	фасонное изделие	4	38,00	152,00
500	фасонное изделие	7	71,00	497,00
630	фасонное изделие	6	92,00	552,00
250	воздушный клапан	10	71,43	714,30
Суммарная стоимость, бел. руб.:				3793,70

Одним из критериев эффективной системы кондиционирования также являются затраты на ее эксплуатацию. В данном случае для обеих систем кондиционирования подходит одна и та же установка, где расход и потери давления практически одинаковы. Использование программ является эффективным и удобным способом расчета, но следует принимать во внимание некоторые особенности проектирования систем вентиляции. Для большей эффективности стоит проводить расчеты с использованием различных методов аэродинамического расчета.

Список цитированных источников

1. Хрусталеv, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование / Б. М. Хрусталеv [и др.] Под ред. Б.М. Хрусталева. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. г.п.

2. Руководство по началу работы в программе Revit Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knowledge.autodesk.com>. – Дата доступа: 12.05.2022.
3. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях / Е. М. Белова – М. : Евроклимат, 2006. – 640 с.
4. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие / А. В. Нестеренко. – М. : Изд-во З. «Высшая школа», 1971. – 460 с.
5. Павлов, Н. Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Вентиляция и кондиционирование воздуха: справочник проектировщика / Н. Н. Павлов, Ю. И. Шиллер. – М. : Стройиздат, 1992. – Ч.3. – 320 с.
6. Баркалов, Б. В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / Б. В. Баркалов, Е. Е. Карпис. – М. : Стройиздат, 1971. – 263 с.
7. Дячек, П. И. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебное пособие / П. И. Дячек. – М. : Издательство АСВ, 2017. – 676 с.
8. Ананьев, В. А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев [и др.] – М. : Евроклимат, 2001. – 416 с.
9. Богословский, В. Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: учебник для вузов / В. Н. Богословский, О. Я. Кокорин, Л. В. Петров – М. : Стройиздат, 1985. – 367 с.
10. Кокорин, О. А. Современные системы кондиционирования / О. А. Кокорин. – М. : Изд-во физико-математической литературы. 2003. – 272 с.