

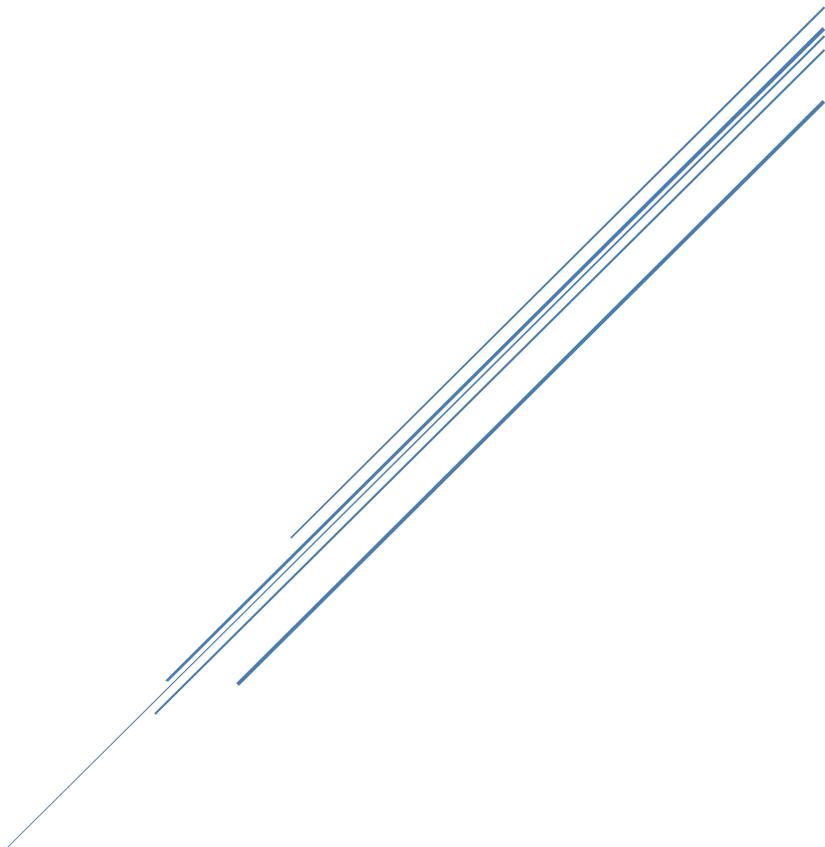
АэроСеть

Аналитический комплекс

Руководство пользователя

Аналитический комплекс «АэроСеть»

Решение вентиляционных и теплофизических задач



06.06.2017

Решение вентиляционных задач	4
Расчёт стационарного воздухораспределения	4
Базовые принципы.....	4
Способы расчёта аэродинамического сопротивления.....	4
Задание сопротивления выработок по проектным данным	5
Задание сопротивления перемычек по проектным данным	7
Типы выработок	9
Типы вентиляторов	13
Редактирование шаблонов вентиляторов.....	14
Основные настройки вентилятора, установленного в выработке	16
Типы размещения вентилятора в выработке.....	17
Настройки вентилятора, работающего в режиме эжектора.....	17
Последовательная и параллельная установка вентиляторов	20
Настройка отображения исходных данных	21
Основные настройки расчёта стационарного воздухораспределения	23
Учёт местных сопротивлений.....	24
Учёт естественной тяги	25
Моделирование воздуховодов	27
Обработка данных расчёта стационарного воздухораспределения	28
Настройка отображения результатов расчёта	28
Измерения на схеме.....	30
Определение типов воздушных потоков.....	31
Проверка режимов работы вентиляторов	33
Проверка скоростей течения воздуха в выработках	36
Расчёт количества воздуха на участках и определение утечек.....	38
Проверка устойчивости	44
Поиск рециркуляционных контуров	46
Вычисление затрат на проветривание выработок	46
Задание направлений выработок по модельным расходам	48
Сохранение модельных расходов в качестве фактических	49
Экспорт вентилятора в Excel.....	49
Экспорт данных в Excel	51
Сохранение режимов проветривания	52

Оптимальное управление	52
Выбор объектов, участвующих в управлении	52
Настройки алгоритма оптимального управления	53
Отображение результатов оптимального управления	55
Обработка данных воздушной съёмки	56
Необходимость автоматизации	56
Задание замеренных расходов в выработках	57
Распределение фактических расходов воздуха по выработкам	58
Проверка корректности распределения расходов	62
Задание замеренного давления воздуха в узлах выработок.....	63
Вычисление приведенного давления.....	65
Распределение давления воздуха по всем узлам выработок.....	67
Проверка корректности распределения давления	70
Подбор проектных сопротивлений на основе фактических.....	71
Решение теплофизических задач	73
Нестационарный теплообмен с породой в одномерной постановке.....	73
Принципы моделирования	73
Учёт гидростатического сжатия воздуха.....	78
Задание режимов проветривания выработки.....	79
Расчёт нестационарного теплообмена	81
Просмотр результатов расчёта.....	82
Сетевая теплофизическая модель	83
Создание новой модели	83
Основные принципы моделирования	84
Факторы в теплофизической модели.....	88
Инициализация теплофизической модели	91
Параметры атмосферы.....	93
Размещение источников тепло- и газовыделения на схеме	94
Расписания работы источников тепло- и газовыделения.....	100
Изменение напора вентиляторов во времени	101
Способы расчёта теплообмена с породой в выработках.....	102
Использование коэффициента теплоотдачи у стенок выработки.....	102
Подключение модели нестационарного теплообмена с породой.....	104
Использование коэффициента нестационарного теплообмена	105
Задание источников влаговыведения.....	107

Расчёт теплофизической модели	110
Сохранение и загрузка результатов расчёта.....	112
Просмотр результатов теплораспределения	113
Продолжение моделирования с определённой точки	114
Отображение числа участков у выработок.....	115
Отображение расходов и скоростей воздуха	116
Отображение температуры воздуха	117
Отображение теплораспределения внутри породы.....	118
Отображение влажности и ощущаемой температуры.....	119
Просмотр концентрации газа и задымления	121
Сохранение температуры воздуха	122
Прогноз задымления в случае реверса вентилятора	123
Расчёт концентрации газа в случае рециркуляции воздуха.....	125
Расчёт потребления кислорода двигателями внутреннего сгорания.....	127
Обработка данных температурной съёмки	128

Решение вентиляционных задач

Расчёт стационарного воздухораспределения

Базовые принципы

Стационарный расчёт воздухораспределения решает задачу вычисления расходов воздуха в выработках Q (объёма воздуха, проходящего через выработку за единицу времени) в режиме штатного проветривания, т.е. когда все параметры течения воздуха находятся в устойчивом равновесии. В этом случае задача обеспечения требуемым количеством воздуха различных участков рудника сводится к подбору таких исходных параметров расчёта, чтобы в каждой выработке расход воздуха не был меньше определённой минимальной величины, а скорость воздуха (определяемая по величине Q и площади поперечного сечения выработки) лежала в допустимых пределах.

Необходимым условием расчёта в этом случае является указание того, каким образом выработки соединены друг с другом, каково их аэродинамическое сопротивление R (величина, отражающая то, какой дополнительный перепад давления создаётся в выработке за счёт того, что воздуху требуется определённое усилие, чтобы пройти по ней), а также где расположены вентиляторы и какой напор они создают. Величина аэродинамического сопротивления каждой выработки R связывается с падением давления в выработке H через квадрат расхода Q по формуле $H = R \cdot Q^2$, так как течение воздуха в выработках носит в основном турбулентный, а не ламинарный характер. Поэтому задача стационарного расчёта воздухораспределения сводится по существу к следующему. Необходимо подобрать расходы Q таким образом, чтобы 1) в каждом узле, в котором соединяются выработки, сумма входящих расходов была равна сумме исходящих (первый закон Кирхгофа); 2) общее падение давления на любом замкнутом контуре в сети выработок равнялось нулю, т.е. на каждом контуре напор вентиляторов должен полностью компенсироваться общим падением давления вследствие аэродинамического сопротивления выработок (второй закон Кирхгофа).

Способы расчёта аэродинамического сопротивления

Предусмотрено три основных способа задания аэродинамического сопротивления выработок и вентиляционных объектов: задание сопротивления по проектным параметрам, на основе данных воздушно-депресссионной съёмки и вручную. Если известно, какой перепад давления образуется в выработке или на перемычке при известном расходе воздуха, то предпочтительным является второй способ задания

сопротивления как наиболее точный. Если же этих данных нет, то следует использовать способ, основанный на использовании проектных данных, который позволит хотя бы оценить это сопротивление. Задание сопротивления вручную предусмотрено для всех остальных случаев, когда, например, для какого-то вентиляционного объекта вроде надшахтного здания не предусмотрена формула определения его аэродинамического сопротивления на основе его проектных параметров.

Полное аэродинамическое сопротивление выработки складывается из её собственного аэродинамического сопротивления и суммы сопротивлений всех вентиляционных сооружений (перемычек), расположенных в ней. При этом способ расчёта каждого из этих сопротивлений выбирается индивидуально. Например, аэродинамическое сопротивление выработки может быть задано на основе данных воздушно-депресссионной съёмки, а сопротивление установленной в ней перемычки – по проектным данным. Это бывает особенно полезно, когда требуется оценивать предполагаемые проектные решения на существующей сети рудника, построенной на основе фактических замеров.

Задание сопротивления выработок по проектным данным

Для оценки аэродинамического сопротивления выработки по её проектным данным используется формула Дарси-Вейсбаха, в которой участвуют длина выработки L , площадь S и периметр P ее поперечного сечения, ускорение свободного падения g , а также коэффициент шероховатости α , который предполагается обусловленным только типом поверхности стенок выработки (т.е. способом её проходки).

$$R = \frac{\alpha \cdot L \cdot P}{g \cdot S^3}$$

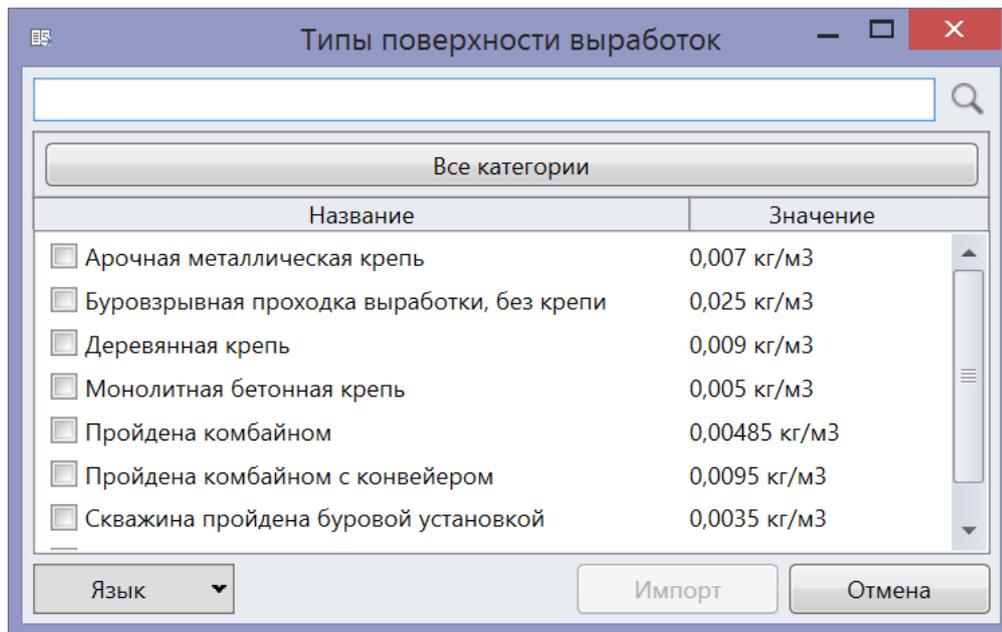
В этом случае, зная типичные значения коэффициента α для выработок, пройденных разными способами, можно оценить аэродинамическое сопротивление R выработки, если известна ее длина и площадь поперечного сечения. Типичные значения α можно найти в справочнике, который открывается после нажатия на кнопку рядом с соответствующим полем.

Аэродинамическое сопротивление

Задается: Проектными данными ▼

Поверхность: Пользовательская ▼

Коеф-т α :  0,004426 Н·с²/м⁴



По умолчанию длина выработки рассчитывается исходя из её геометрического размера на схеме и заданного масштаба физических координат. Однако вычисленную длину всегда можно заменить значением, заданным вручную, что бывает особенно полезно, когда выработка на схеме была нарисована с искажением (например, такое бывает при рисовании вентиляционных стволов).

Длина выработки

Тип: Задается вручную

Длина: м

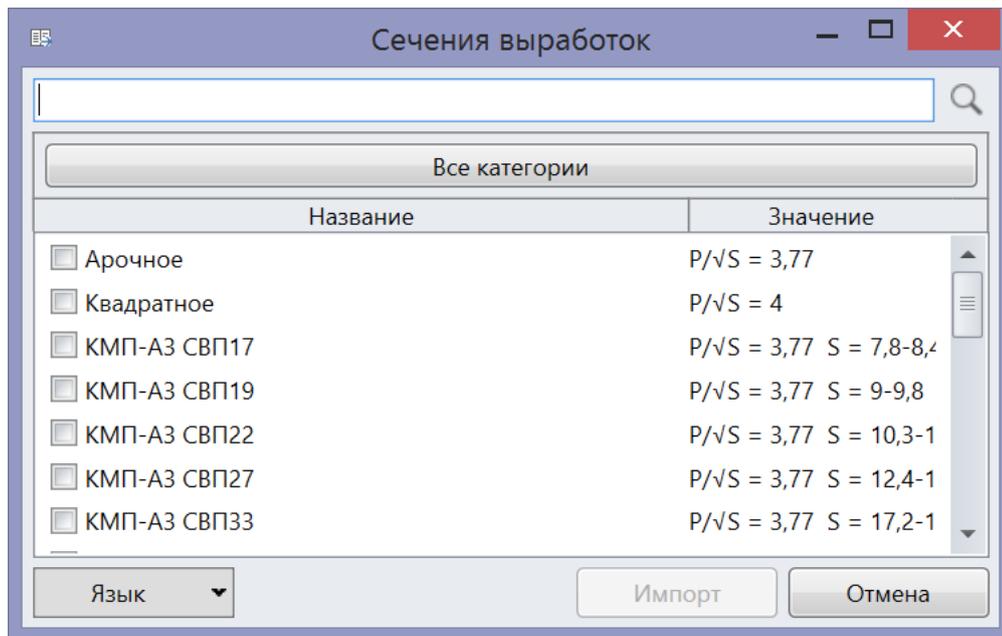
Что касается площади сечения выработки, то она чаще всего известна и обусловлена, к примеру, типом проходческого комбайна. Основные площади поперечного сечения доступны в справочнике, открываемом по кнопке рядом с соответствующим полем.

Поперечное сечение

Тип: Пользовательский

Площадь: м²

Периметр: м



Периметр поперечного сечения выработки, в свою очередь, целиком определяется площадью поперечного сечения и его формой. Наименьшее значение периметра соответствует выработке круглой формы, поэтому в поле с периметром нельзя ввести меньшее значение, чем периметр круглого сечения для указанной площади. Что касается других форм сечений, то они доступны в том же справочнике, в котором заданы соотношения периметров разных сечений к корню квадратному от их площади.

Поперечное сечение

Тип: Пользовательский

Площадь: 10 м²

Периметр: 11,2 м

Задание сопротивления перемычек по проектным данным

Предусмотрено два основных способа определения аэродинамического сопротивления перемычек по проектным данным: определение сопротивления перемычки с вентиляционным окном по площади этого ветокна и определение сопротивления глухой перемычки по её воздухопроницаемости.

Для определения аэродинамического сопротивления перемычки с ветокном используется формула Жуковского. Для этого сначала ищется решение следующего уравнения.

$$\tan(\alpha) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \alpha}{\pi \cdot \tan(2 \cdot \alpha)} \right) = \frac{S_w}{S}$$

S_w – площадь ветокна круглой формы

S – площадь поперечного сечения выработки

А уже затем вычисляется проектное аэродинамическое сопротивление R .

$$\theta = \frac{\pi}{\pi + \frac{4 \cdot \alpha}{\tan(2 \cdot \alpha)}}$$

$$R = \left(\frac{S}{S_w \cdot \theta} - 1 \right)^2 \cdot \rho$$

ρ – плотность воздуха

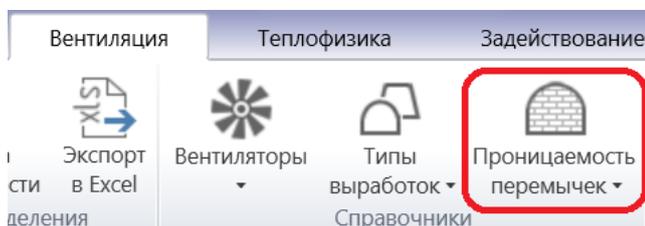
Для определения аэродинамического сопротивления глухой перемычки используется проектное значение её воздухопроницаемости.

$$R = \frac{1}{p^2 \cdot S^2}$$

p – воздухопроницаемость перемычки

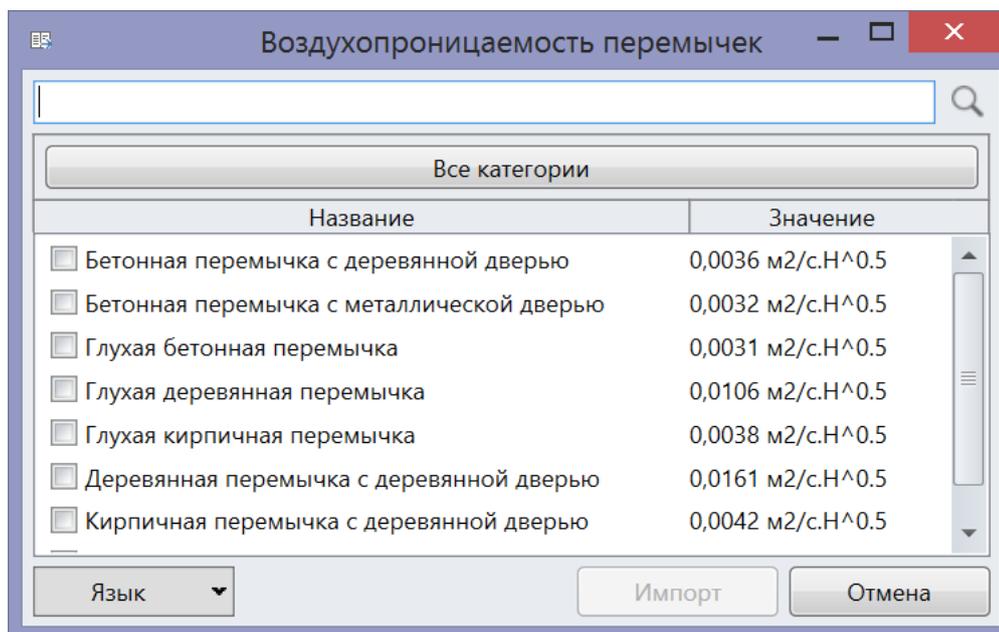
S – площадь поперечного сечения выработки (равная площади глухой перемычки)

По умолчанию значение воздухопроницаемости перемычки определяется на основе её типа. Воздухопроницаемость же всех типов глухих перемычек настраивается централизованно в специальном редакторе проницаемости перемычек, доступном на вкладке *Вентиляция*.



Тип перемычки	Воздухопроницаемость
Дверь вентиляционная автоматическая	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная автоматическая (бетонная)	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная автоматическая (деревянная)	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная автоматическая (кирпичная)	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная автоматическая (металлическая)	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная закрытая	0,000319 м2/с.Н^0.5
Дверь вентиляционная закрытая (бетонная)	0,000319 м2/с.Н^0.5

При этом типовые значения воздухопроницаемости перемычек можно подставлять из справочника, открывающегося при помощи кнопки рядом с полем для ввода воздухопроницаемости.



Если воздухопроницаемость будет указана для каждого типа глухих перемычек, то для конкретной перемычки она будет подставляться автоматически.

Воздухопроницаемость

Тип: Задается вручную

Значение: 0,0003 м²/с.Н^{0.5}

Однако подобное значение воздухопроницаемости всегда можно переопределить вручную.

Воздухопроницаемость

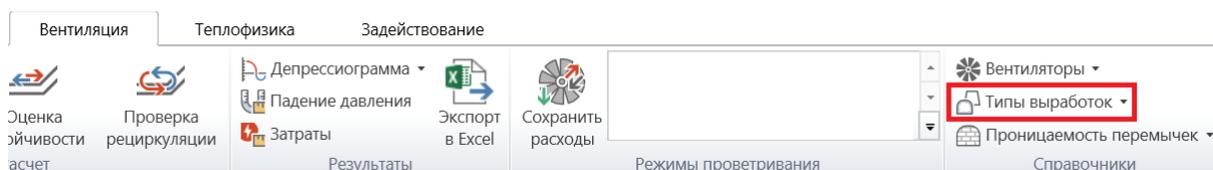
Тип: Задается вручную

Значение:

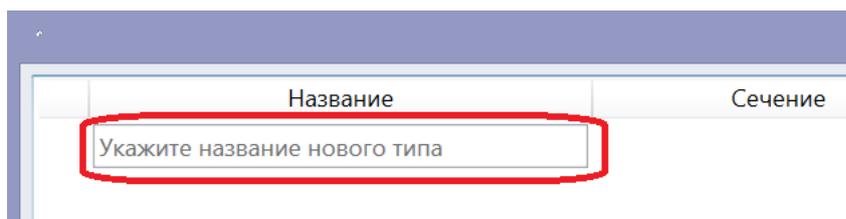
Типы выработок

Чаще всего вентиляционная сеть состоит из очень большого числа выработок, что делает весьма затруднительным задание проектных параметров каждой из них по отдельности. Поэтому в таких случаях целесообразно группировать проектные параметры сходных между собой выработок, а уже потом просто задавать нужный тип выработки. В этом случае станет возможно изменять проектные параметры выработок централизованно, а также получить более простой графический способ определения того, какие проектные параметры имеют различные выработки на схеме.

Для этих целей предусмотрен редактор типов выработок, доступный на вкладке *Вентиляция*.



Чтобы добавить новый тип выработки, нужно просто начать печатать его название в соответствующем поле.



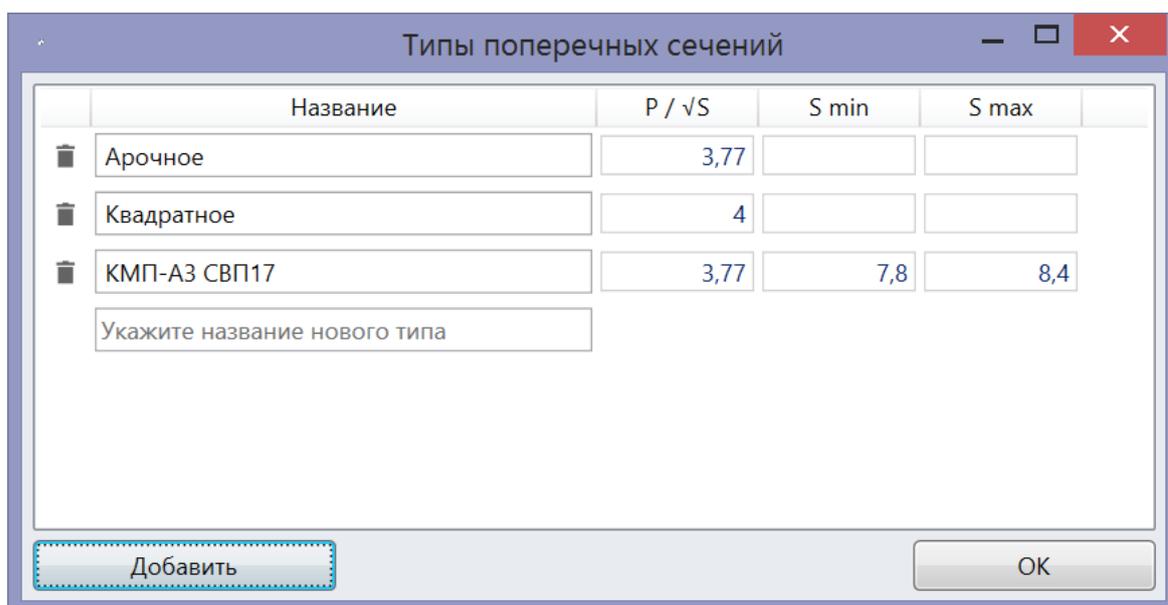
У каждого типа выработки указывается название, форма и площадь поперечного сечения, тип поверхности стенок, максимальная допустимая скорость движения воздуха в выработке согласно правилам безопасности и специальный цвет, которым будут закрашиваться соответствующие выработки на схеме. По умолчанию списки форм поперечного сечения выработок и типов поверхностей пусты, но их можно заполнить из тех же самых справочников, которые использовались для задания периметра поперечного сечения выработки и коэффициента шероховатости α на панели свойств выработки. Кроме того, там же можно создать и свои собственные записи, если ни одно из справочных значений не окажется подходящим. В редакторе форм поперечных сечений выработок в таком случае нужно задать коэффициент K , вычисляемый по следующей формуле.

$$K = \frac{P}{\sqrt{S}}$$

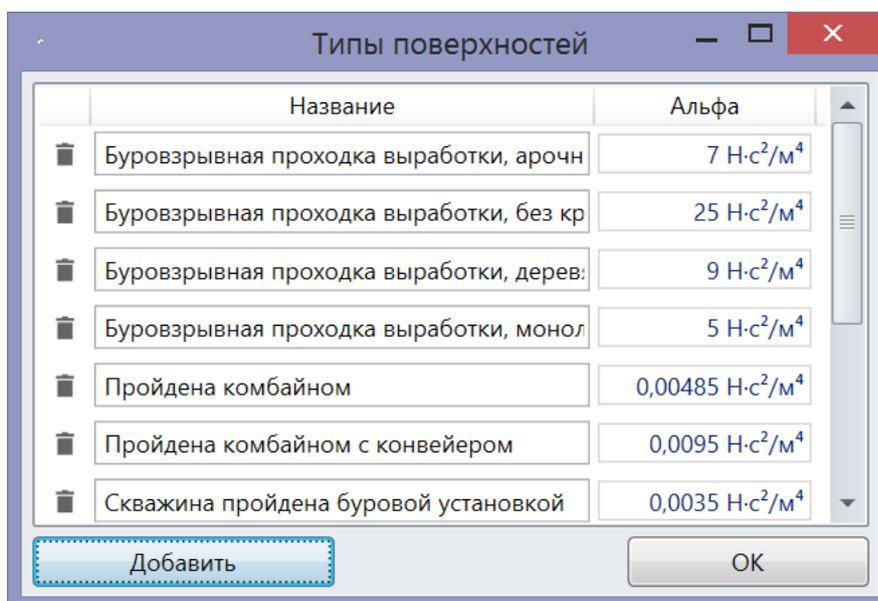
P – периметр поперечного сечения выработки

S – площадь поперечного сечения выработки

В итоге периметр поперечного сечения выработки можно будет всегда однозначно вычислить из площади её сечения. Кроме того, для каждого типа сечения можно указать диапазон допустимых площадей. В этом случае площадь выработки будет проверяться, и если её значение будет выходить за пределы диапазона, то тип сечения будет заменяться на пользовательский.



В редакторе типов поверхностей можно таким же способом задать характерные значения коэффициенты шероховатости α .



✿ Типы выработок

	Название	Сечение
🗑	Восстающая выработка	Круглое
🗑	Выработка	Арочное
🗑	Проектная восстающая выработка	Прямоугольное 3/4
🗑	Проектная выработка	Арочное
🗑	Ствол "Вентиляционный"	Круглое
🗑	Ствол "Воздухопадающий"	Круглое
🗑	Ствол "Воздухопадающий-клетевой"	Круглое
🗑	Ствол "Камышинский"	Круглое

Сечения Поверхности

Поверхность	S	V max	Цвет	По умолчанию
Скважина пройдена бурово	2 м2			<input type="checkbox"/>
Арочная металлическая кре	20 м2	6 м/с		<input type="checkbox"/>
Бетонная крепь	12 м2			<input type="checkbox"/>
Арочная металлическая кре	13 м2	6 м/с		<input type="checkbox"/>
Вентиляционный ствол	33,2 м2	15 м/с		<input type="checkbox"/>
Воздухопадающий ствол	15,9 м2	15 м/с		<input type="checkbox"/>
Воздухопадающий ствол	38,5 м2	15 м/с		<input type="checkbox"/>
Воздухопадающий ствол	33,2 м2	15 м/с		<input type="checkbox"/>

OK

Кроме того, один из типов выработок можно назначить типом по умолчанию. В этом случае этот тип будет автоматически присваиваться всем добавляемым выработкам.

В результате, заполнив справочник типов выработок, можно указывать уже не отдельные свойства выработки, а просто выбирать нужный тип выработки из списка.

Общее

Вентиляция

Теплофизика

Аварии

Индикаторы

Аэродинамическое сопротивление

Тип выработки

Арочная СВП 12

Поперечное сечение

Арочное

Площадь: 12 м²

Периметр: 12,3 м

Длина выработки

Тип: Задается вручную

Длина: 123 м

Аэродинамическое сопротивление

Задается: Воздушной съемкой

Расход: 3 м³/с

Падение P: Задается вручную

ΔP : 24 Па

Скорость воздуха

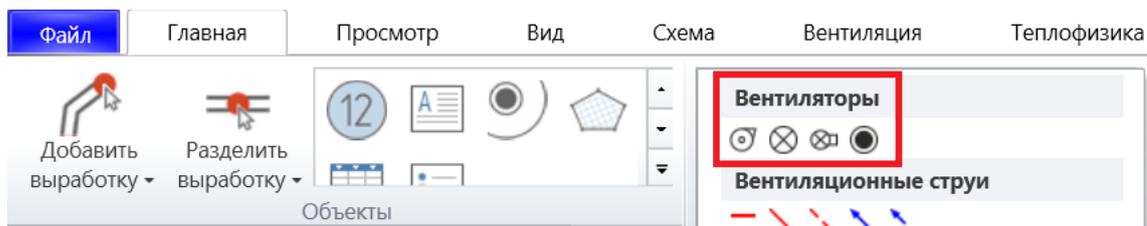
V max: 15 м/с

В этом случае поля со свойствами поперечного сечения, аэродинамического сопротивления и максимальной допустимой скорости движения воздуха заполнятся сами. Кроме того, появится возможность включить подсветку типов выработок на схеме (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Цвет типа выработки внутри*). При этом по-прежнему останется возможность редактировать все эти поля, однако при этом тип выработки будет автоматически изменён на значение «Пользовательский».

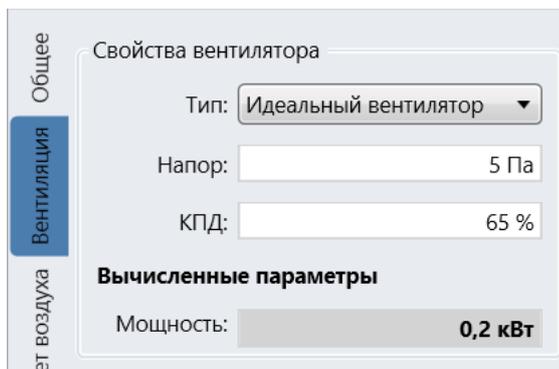
Что касается длины выработки, то по умолчанию она рассчитывается по координатам, однако всегда есть возможность задать её вручную. Ручное задание длины выработки может быть особенно полезным, если сама выработка нарисована на схеме с искажением, что часто случается при рисовании очень длинных выработок, например, стволов. По умолчанию поле с длиной выработки, заданной вручную заполняется на основе длины, рассчитанной по координатам, после чего в этом поле всегда отображается одно и то же значение. Если же в какой-то момент требуется сохранить ручной расчёт длины выработки, но снова поместить в это поле значение, рассчитанное по координатам, то для этого нужно перед сохранением свойств выработки очистить соответствующее поле.

Типы вентиляторов

Все вентиляторы моделируются путём размещения объектов на выработках из соответствующей категории.



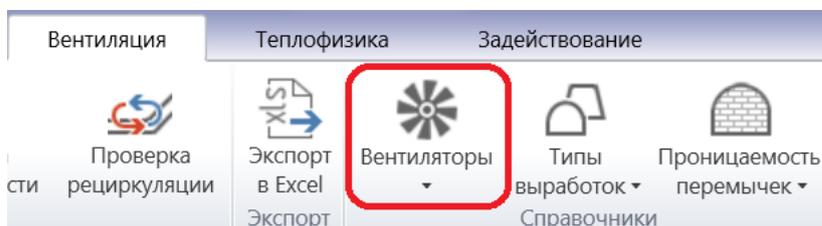
При этом существует два основных типа вентиляторов: идеальный вентилятор и реальный (детальный) вентилятор.



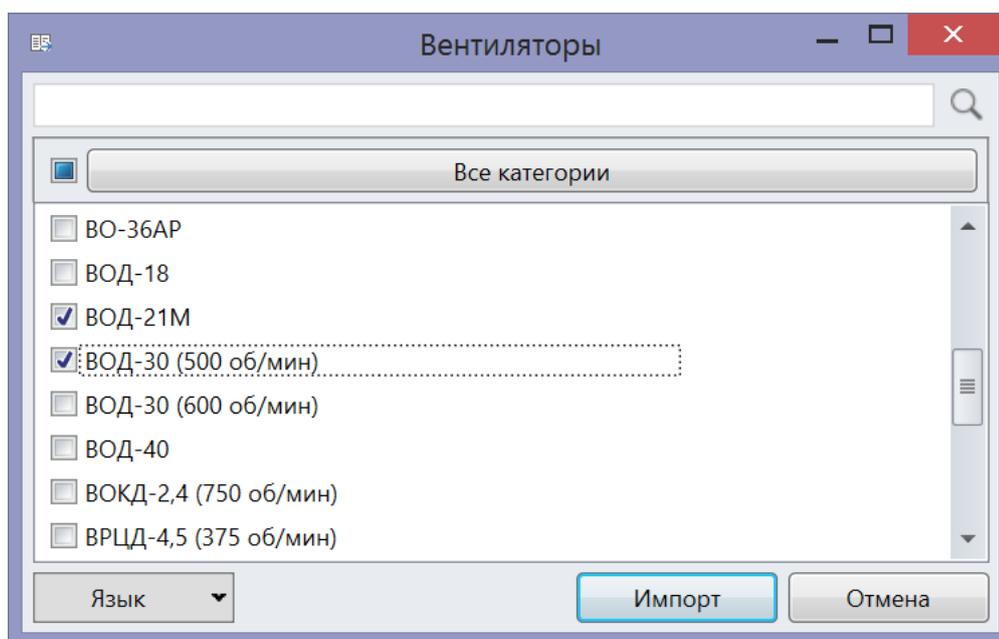
Идеальный вентилятор позволяет задать определённый напор, который не будет зависеть от каких-то других параметров. Там же можно указать КПД вентилятора, что позволит оценить его мощность. Это бывает особенно полезно, когда сначала требуется построить простую вентиляционную модель и только потом уточнить её, задав реальный тип вентилятора, который позволяет не указывать напор вручную, а вычислять его на основе набора таких проектных параметров, как производитель вентилятора, угол наклона лопаток, частота вращения вентилятора и пр.

Редактирование шаблонов вентиляторов

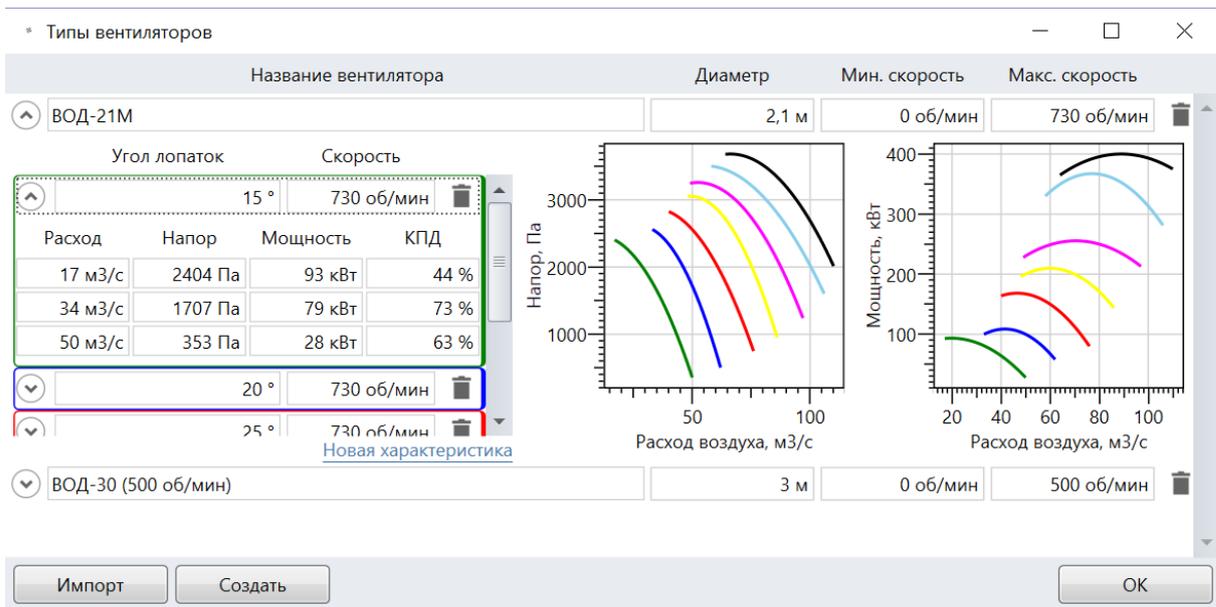
Все проектные параметры для различных реальных вентиляторов задаются в редакторе вентиляторов, доступном на вкладке *Вентиляция*.



Чтобы создать шаблон нового вентилятора, достаточно нажать кнопку *Создать*, однако в таком случае все параметры вентилятора придётся задавать вручную. Самым простым способом является добавление вентилятора из справочника путём нажатия на кнопку *Импорт*. В этом случае шаблон вентилятора добавляется уже заполненным.



У каждого вентилятора указывается его название, диаметр лопастей, минимальная и максимальная скорость вращения, а также набор рабочих характеристик. Каждая такая характеристика представляет собой зависимость напора и мощности вентилятора от расхода воздуха для определённого угла наклона лопаток. Подобные зависимости предоставляются производителями вентиляторов и аппроксимируются в программе параболой, заданными по трём точкам. Первая точка должна задавать напор и мощность вентилятора для минимального рабочего расхода воздуха, за которым начинается область помпажа. Третья точка должна соответствовать напору и мощности вентилятора для максимального рабочего расхода воздуха. Вторая же точка должна лежать в произвольной области между первой и третьей и задавать кривизну напорной и мощностной характеристики. Если мощностная характеристика вентилятора представлена линиями КПД, то в этом случае вместо значения мощности можно указывать значения КПД.



Основные настройки вентилятора, установленного в выработку

Когда реальный вентилятор установлен в выработку, то в первую очередь для него следует выбрать подходящий шаблон из редактора вентиляторов.

Свойства вентилятора

Тип: Реальный вентилятор

Шаблон: VM-6M

Лопатки: Угол -45°

Скорость: 2980 об/мин
от 100 до 2980 об/мин

После этого станет возможным выбрать один из углов лопаток, для которого заданы напорная и мощностная характеристики для указанного шаблона вентилятора. Кроме того, необходимо установить скорость вращения вентилятора в пределах, заданных шаблоном. При этом напорная $H(q)$ и мощностная $W(q)$ характеристики вентилятора будут вычисляться следующим образом. Сначала будут выбраны характеристики $H_0(q)$ и $W_0(q)$ для скорости вращения n_0 , указанной в шаблоне вентилятора. А затем эти характеристики будут пересчитаны для фактической частоты вращения вентилятора n по следующим формулам.

$$H(q) = H_0\left(q \cdot \frac{n_0}{n}\right) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2$$

$$W(q) = W_0\left(q \cdot \frac{n_0}{n}\right) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3$$

Типы размещения вентилятора в выработке

Помимо проектных параметров самого вентилятора на его напор влияет также способ размещения вентилятора в выработке.

Свойства вентилятора

Тип: Реальный вентилятор

Шаблон: VM-6M

Лопатки: Угол -45°

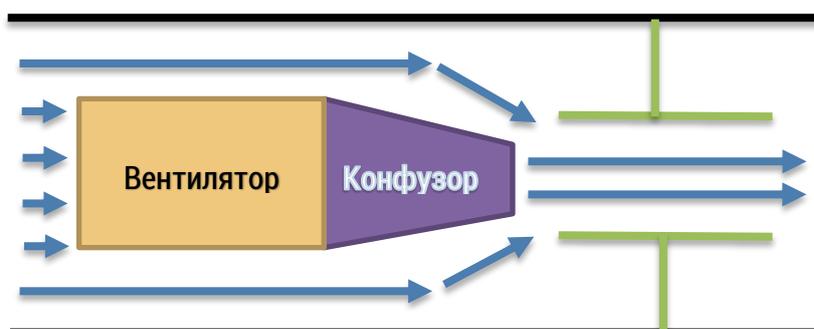
Скорость: 2980 об/мин
от 100 до 2980 об/мин

Установка: **Внутри перемычки**

Если вентилятор размещён «Внутри перемычки», т.е. воздух не может идти по выработке, минуя вентилятор, то его итоговая напорная $H(q)$ и мощностная $W(q)$ характеристики берутся неизменными. Если же вентилятор работает в составе эжекторной установки («Перед камерой смешения») или же установлен «Без перемычки», то $H(q)$ и $W(q)$ нуждаются в дополнительной корректировке.

Настройки вентилятора, работающего в режиме эжектора

Эжекторная установка представляет собой вентилятор, который установлен перед трубой, называемой камерой смешения, диаметр которой больше диаметра выходного отверстия вентилятора, поэтому исходящая струя захватывает в трубу воздух, который попадает туда, огибая вентилятор по краям. Это позволяет пропустить через эжекторную установку намного больший расход воздуха, если сопротивление проветриваемого участка невелико, чем если бы вентилятор работал внутри перемычки, потому что в таком случае расход в выработке был бы ограничен максимальным рабочим расходом вентилятора. Эжектор же позволяет добиться кратного увеличения расхода в выработке по сравнению с расходом внутри вентилятора.



Если предположить, что общий импульс потоков воздуха, проходящих через эжекторную установку, меняется лишь на величину, равную импульсу, который сообщает вентилятор воздуху, проходящему непосредственно через него, то можно вывести следующую формулу для вычисления итоговой напорной характеристики.

В начале следует определить, чему равен расход воздуха q , который проходит непосредственно через вентилятор. Если на вентиляторе не установлено специальное приспособление, называемое конфузуром, сужающее площадь исходящей струи, то считается, что вентилятор будет работать на своём максимальном допустимом расходе, заданном в шаблоне. Если же конфузор установлен, то он будет создавать добавочное аэродинамическое сопротивление R_k и расход q будет меньше максимального. В таком случае сначала используется соответствующая формула из справочника Идельчика «Местные гидродинамические сопротивления», чтобы вычислить R_k .

$$\chi = \left(-0.0125 \cdot \left(\frac{S_k}{S_f} \right)^4 + 0.0224 \cdot \left(\frac{S_k}{S_f} \right)^3 - 0.00723 \cdot \left(\frac{S_k}{S_f} \right)^2 + 0.00444 \cdot \frac{S_k}{S_f} - 0.00745 \right) \times \\ \times ((0.01745 \cdot \alpha_k)^3 - 2 \cdot \pi \cdot (0.01745 \cdot \alpha_k)^2 - 10 \cdot (0.01745 \cdot \alpha_k)) \\ R_k = \frac{\chi \cdot \rho}{2 \cdot g \cdot S_k^2}$$

S_k – площадь выходного отверстия конфузора.

S_f – площадь поперечного сечения вентилятора.

α_k – угол сужения конфузора.

ρ – плотность воздуха.

g – ускорение свободного падения.

Причём в свойствах эжекторной установки задаётся не сам угол сужения α_k , а диаметр выхода D_k и длина L_k конфузора, где

$$\alpha_k = 2 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{D_f - D_k}{2 \cdot L_k}\right)$$

D_f – диаметр вентилятора.

Установка:

Расход на вентил-ре: Задается вручную

D камеры:

R перемычки:

Конфузор:

D выхода:

Длина:

Далее при помощи сопротивления конфузора R_k вычисляется расход внутри вентилятора как корень следующего уравнения.

$$H(q) = R_k \cdot q^2$$

$H(q)$ – напорная характеристика вентилятора, работающего в составе эжектора.

Что касается напорной характеристики всей эжекторной установки $H_k(q)$, то она вычисляется по следующей формуле.

$$a = \begin{cases} \frac{1}{S}, & \text{если } Q \geq 0 \\ \frac{1}{S_{chamber}}, & \text{если } Q < 0 \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} \frac{1}{S_{chamber} - S_k}, & \text{если } Q - q \geq 0 \\ \frac{1}{S - S_k}, & \text{если } Q - q < 0 \end{cases}$$

$$dp_1 = Q^2 \cdot \left(\frac{1}{S_{chamber}} - \frac{1}{S} \right) \cdot a$$

$$dp_2 = (Q - q)^2 \cdot \left(\frac{1}{S_{chamber} - S_k} - \frac{1}{S - S_k} \right) \cdot b$$

$$dp_3 = \frac{1}{S_{chamber}} \cdot \left(\frac{(Q - q)^2}{S_{chamber} - S_k} + \frac{q^2}{S_k} - \frac{Q^2}{S_{chamber}} \right)$$

$$H_k(q) = \frac{\rho}{g} \cdot (dp_1 - dp_2 + dp_3)$$

S – площадь поперечного сечения выработки.

$S_{chamber}$ – площадь поперечного сечения камеры смешения.

S_k – площадь выходного отверстия конфузора (или вентилятора, если конфузора нет)

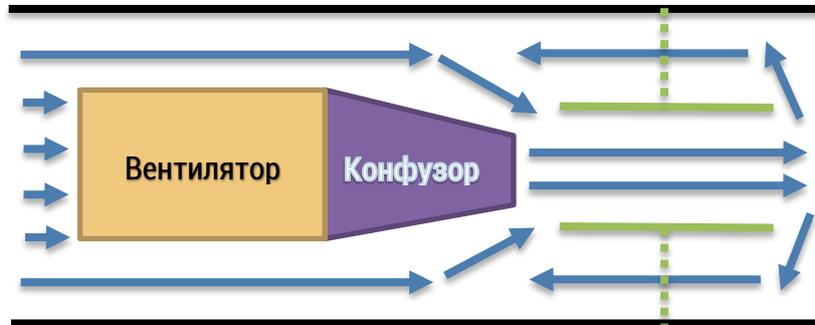
q – расход внутри вентилятора.

Q – общий расход воздуха в выработке.

ρ – плотность воздуха.

g – ускорение свободного падения.

Однако иногда бывает, что камера смешения смонтирована без глухой перемычки так, что воздух, пройдя камеру смешения, имеет возможность снова вернуться к вентилятору.



В общем случае можно считать, что перемычка, в которой установлена камера смешения имеет некоторое известное сопротивление R (очень большое, если перемычка глухая, и нулевое, если перемычки совсем нет). В таком случае можно вычислить полное аэродинамическое сопротивление перемычки R_{full} с учетом сужения-расширения воздушного потока.

$$R_{full} = R + \frac{1}{\rho \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{S - S_{chamber}} - \frac{1}{S_{chamber}} \right)^2$$

Вычислив R_{full} , следует найти расход воздуха q_b , который возвращается назад через перемычку, решая следующее уравнение.

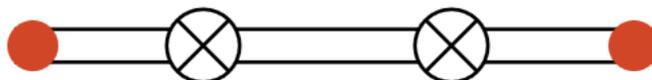
$$q_b = \sqrt{\frac{H_k(Q - q_b)}{R_{full}}}$$

Зная же q_b , итоговый напор эжекторной установки можно вычислить по следующей формуле.

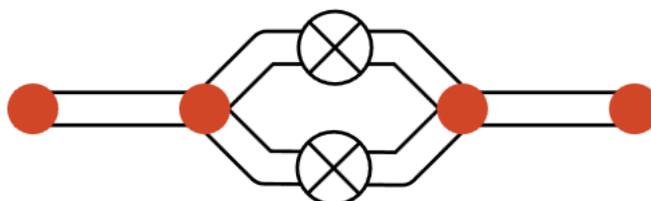
$$H_k(Q) = H_k(Q - q_b)$$

Последовательная и параллельная установка вентиляторов

Иногда несколько вентиляторов устанавливают вместе. В этом случае существует две основные схемы их работы: параллельная и последовательная. В случае последовательной схемы воздух, прошедший через один вентилятор, попадает в следующий вентилятор, каждый из которых увеличивает общий напор. Чтобы установить вентиляторы подобным образом на схеме, их следует просто разместить на одной и той же выработке.



В случае же параллельной схемы каждый вентилятор пропускает через себя только свою долю общего расхода. Чтобы отразить это на схеме, следует разместить вентиляторы в параллельно идущих выработках, если такие выработки действительно присутствуют в руднике, либо в противном случае добавить воображаемые выработки с нулевым аэродинамическим сопротивлением.



Если параллельно работающие вентиляторы имеют одинаковые параметры, то проще всего задать число таких вентиляторов на панели свойств.

Общие

Свойства вентилятора

Вентиляция

Тип: Реальный вентилятор
 Шаблон: VM-8M
[Создать новый шаблон](#)
 Лопатки: Угол -50°
 Скорость: 2980 об/мин
от 100 до 2 980 об/мин

Расчет воздуха

В параллели:
 Установка: Внутри перемычки

Настройка отображения исходных данных

Исходными данными для расчёта стационарного воздухораспределения являются, в первую очередь, аэродинамические сопротивления выработок и перемычек. Эти значения можно просматривать на панели свойств соответствующих объектов.

Вычисленные параметры

Спротив-ие: 0,00118 кМюрг

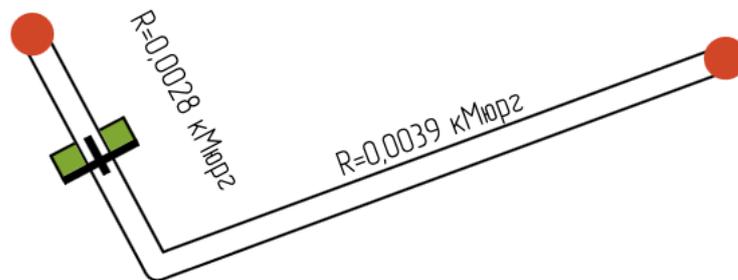
Аэродинамическое сопротивление

R = 0,00276 кМюрг

Задается: Проектными данными

S вентокна: 5 м²

Кроме того, те же самые данные можно отобразить в виде индикаторов в меню Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Выработки (индикаторы) -> Аэродинамические сопротивления и Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Объекты на выработках (индикаторы) -> Аэродинамические сопротивления перемычек.



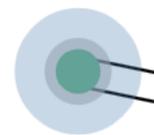
Полезным также бывает подсветить конечные вершины выработок, которые имеют связь с атмосферой (Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Конечные вершины -> Связь с атмосферой).

Общие свойства

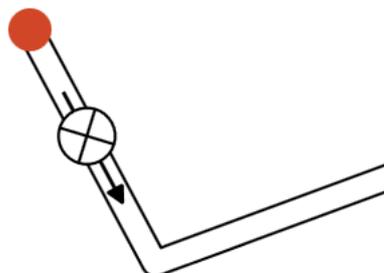
Высотная отметка: 0 м

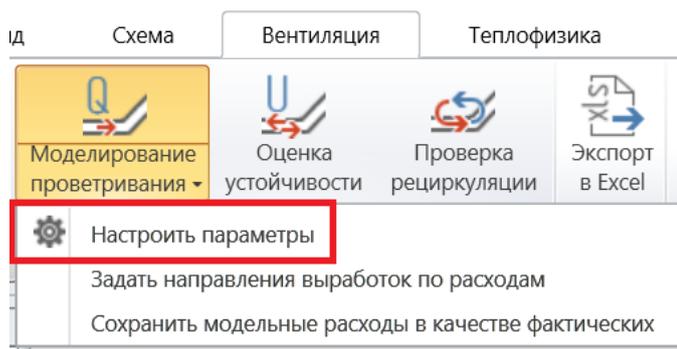
Температура воздуха: 20 °C

Связь с атмосферой:

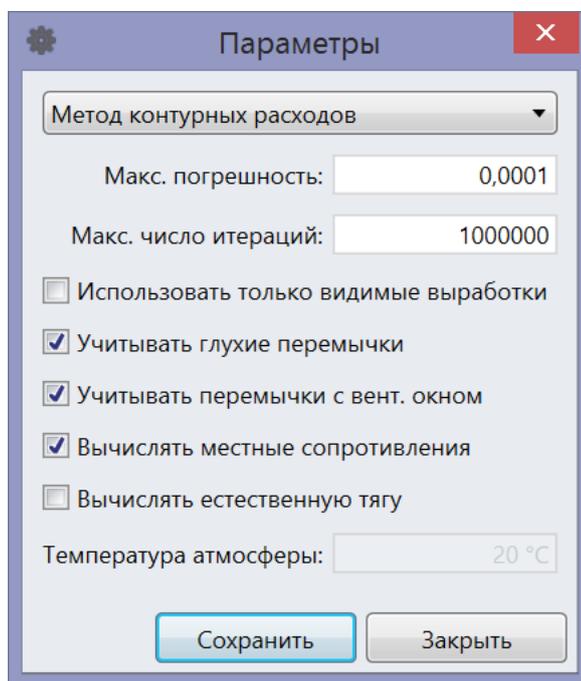


В довершение всего следует проверить направления, в которых создают напор вентиляторы, установленные в выработках (Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Объекты на выработках -> Направления вентиляторов).





Для расчёта стационарного воздухораспределения могут быть использованы два метода: метод контурных расходов и метод Кросса. Оба они работают по одному принципу: в сети выработок выделяется набор замкнутых контуров, в каждом из которых путём корректировки расходов итерационно увязывается напор, создаваемый вентилятором и падение давления вследствие аэродинамического сопротивления выработок и перемычек. Основным является метод контурных расходов, так как в нем падение давления увязывается сразу на всех контурах одновременно, что обеспечивает более быструю сходимость. Метод Кросса же увязывает падение давления только в одном контуре за итерацию, поэтому сходится очень медленно на больших сетях.



Расчёт стационарного воздухораспределения считается успешно завершённым, когда разница между напором вентиляторов и падением давления вследствие аэродинамического сопротивления на всех контурах становится меньше величины, указываемой в настройках (поле «Максимальная погрешность»). Чтобы расчёт завершался гарантированно, число итераций также ограничено некоторым предельным

значением, задаваемым в поле «Максимальное число итераций». Если расчёт нужно произвести только для какой-то части схемы (например, на одной схеме нарисованы несколько вариантов вентиляционных схем), то следует поместить нужную часть схемы на отдельный участок или в отдельный слой, затем оставить видимым только его, а потом использовать опцию «Учитывать только видимые выработки».

Кроме того, иногда бывает, что учёт аэродинамического сопротивления некоторых категорий перемычек требуется отключить. К примеру, если аэродинамические сопротивления выработок были заданы по данным воздушно-депресссионной съёмки, то сопротивление всех существующих перемычек внутри выработок было учтено как аэродинамическое сопротивление самих выработок. Тем не менее местоположение перемычек на таких сетях требуется отметить установкой соответствующих объектов на выработках, которые будут добавлять аэродинамическое сопротивление, которое не требуется учитывать. В таком случае можно просто отключить опции «Сопротивление глухих перемычек» и «Сопротивление перемычек с вентокном».

Учёт местных сопротивлений

Если аэродинамические сопротивления на схеме заданы по проектным данным, то для получения точной картины помимо аэродинамических сопротивлений выработок и перемычек требуется оценивать также так называемые местные сопротивления. Такие сопротивления связаны с какими-то местными особенностями течения воздуха, которые приводят к появлению дополнительного аэродинамического сопротивления, не связанного ни с трением воздуха о стенки выработок, ни с сопротивлением на перемычках. К примеру, дополнительное сопротивление может возникать в местах изгиба выработок. Однако на данный момент в программе доступен только один вариант учёта местных сопротивлений, а именно учёт сопротивления за счёт расширения-сжатия при смешивании воздушных потоков. Это бывает особенно полезно, когда разработка ведётся камерным способом.

При этом для каждой выработки, по которой воздух вытекает из узла, вычисляется добавочный перепад давлений dP^+ по следующей формуле.

$$dP^+ = \frac{\sum Q^+ \cdot Q_i \cdot (V^+ - V_i)^2}{2 \cdot (\sum Q_i)^2} \cdot \rho$$

dP^+ - перепад давления в Паскалях для текущей выработки, образовавшийся из-за местного расширения/сжатия воздушного потока

Q^+ - расход воздуха в текущей выработке, в которой определяется dP^+

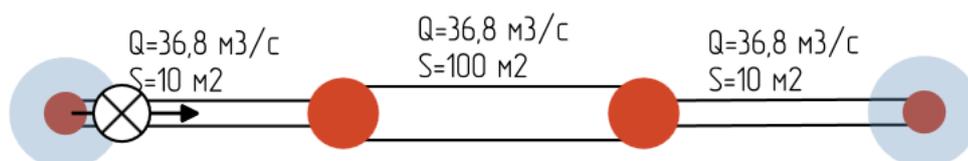
Q_i - расход в каждой i -ой выработке, по которой воздух выходит из начального узла текущей выработки (в формуле учитываются только исходящие из узла расходы)

V^+ – скорость воздуха в текущей выработке

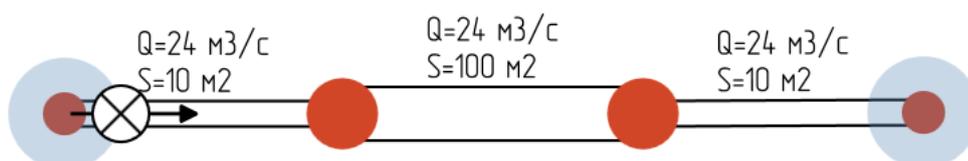
V_i – скорость воздуха в i -ой выработке, по которой воздух выходит из начального узла текущей выработки

ρ – плотность воздуха

Теперь рассмотрим пример простой вентиляционной сети, в которой был проведён расчёт стационарного воздухораспределения без учёта местных аэродинамических сопротивлений.



Выработка посередине представляет собой широкую камеру площадью поперечного сечения 100 кв. м., в которую входит и выходит одна узкая выработка площадью поперечного сечения 10 кв. м. При этом расход в выработках составляет почти 37 куб. м. в с.



Однако после включения учёта местных аэродинамических сопротивлений расход падает до 24 куб. м. в с. Таким образом, при расчёте по проектным данным вентиляционных сетей, в которых сечения выработок сильно отличаются между собой, для получения точной картины воздухораспределения требуется обязательно включать учёт местных аэродинамических сопротивлений.

Учёт естественной тяги

При движении по выработкам воздух постепенно меняет свою температуру вследствие, например, теплообмена с окружающей выработки породой. Результатом этого является то, что при наличии перепада высот возникает дополнительный напор, связанный с тем, что вес разных столбов воздуха отличается из-за разности плотностей при разной температуре. Образуется так называемый эффект естественной тяги. В случае работы главной вентиляционной установки этим эффектом чаще всего можно пренебречь, так как его влияние укладывается в погрешность измерений. Однако в случае моделирования остановки ГВУ пренебрегать естественной тягой нельзя.

Для вычисления в каждой выработке дополнительного напора P_{weight} , связанного с весом воздуха, используется следующая формула.

$$P_{weight} = g \cdot (H_{from} - H_{to}) \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0 + 273.15}{\frac{T_{from} + T_{to}}{2} + 273.15}$$

P_{weight} – давление, создаваемое весом воздуха в выработке

g – ускорение свободного падения

H_{to} – высотная отметка конечного узла выработки

H_{from} – высотная отметка начального узла выработки

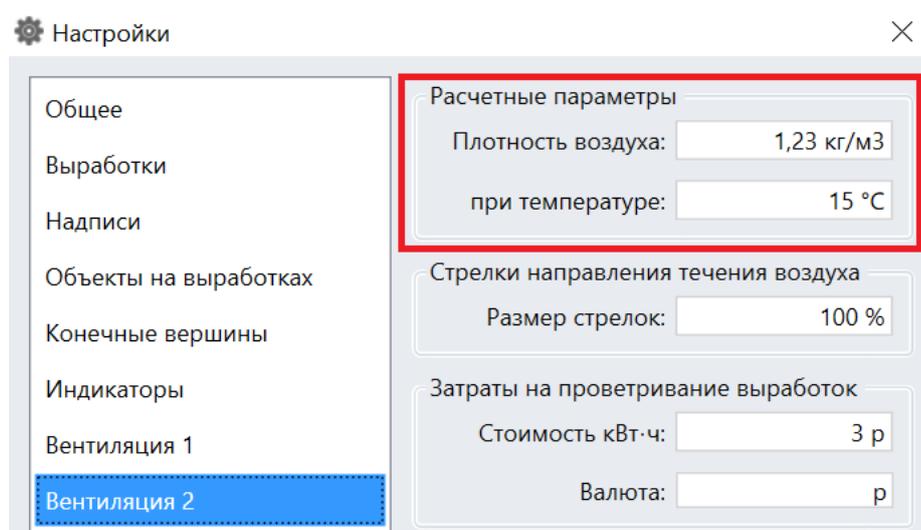
ρ_0 – плотность воздуха при температуре T_0

T_0 – температура воздуха, для которой задана плотность воздуха

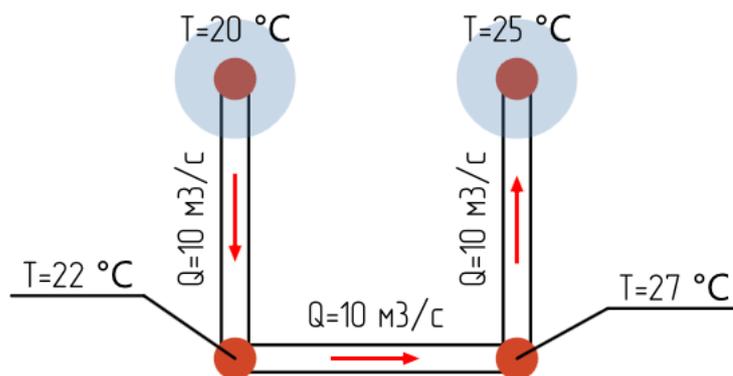
T_{to} – температура воздуха в конечном узле выработки

T_{from} – температура воздуха в начальном узле выработки

Эталонная плотность воздуха при заданной температуре задаётся в настройках (*Настройки -> Вентиляция 2 -> Расчётные параметры*).



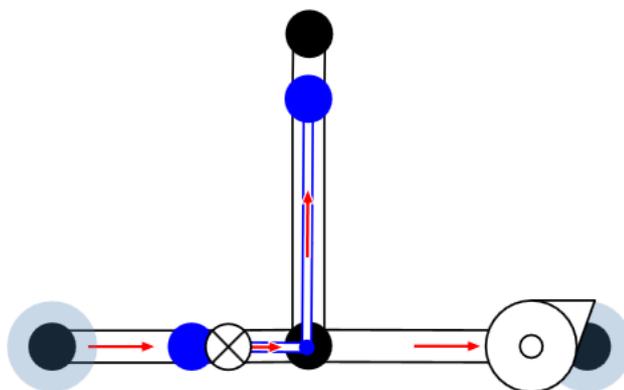
В таком случае получается, что разница напоров P_{weight} в местах соединения выработок и будет давать искомую естественную тягу. Но для этого во всех узлах выработок необходимо задать высотную отметку и температуру воздуха. Рассмотрим следующий пример.



Рудник состоит из двух вертикальных стволов длиной 400 метров, которые соединяет единственная выработка длиной 15 км. На входе воздух имеет температуру 20 градусов Цельсия, затем вследствие гидростатического сжатия нагревается до 22 градусов, потом, взаимодействуя с породой, нагревается до 27 градусов, и в конечном счёте при подъёме вверх остывает до 25 градусов. В результате вес столбов воздуха в стволах получается разный, и возникает эффект естественной тяги, когда холодный воздух в левом стволе выдавливает тёплый воздух в правом. Если для этой схемы запустить расчёт стационарного воздухораспределения, указав опцию «Естественная тяга», то даже без установки вентиляторов в выработках образуются ненулевые расходы, направленные от области холодного воздуха к области тёплого.

Моделирование воздухопроводов

Для моделирования ситуации подачи воздуха в шахту по воздуховодам следует использовать обычные выработки, которые можно расположить на отдельном слое поверх обычных выработок. К примеру, на схеме ниже моделируется проветривание тупиковой выработки при помощи вентилятора местного проветривания.

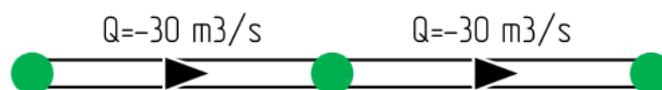


Настройка отображения результатов расчёта

После выполнения расчёта стационарного воздухораспределения важно правильно интерпретировать полученные результаты. В первую очередь следует выяснить направления модельных расходов. Если просто включить отображение модельных расходов в выработках (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки (индикаторы) -> Расходы воздуха*), то неясным останется направление, в котором движется воздух.



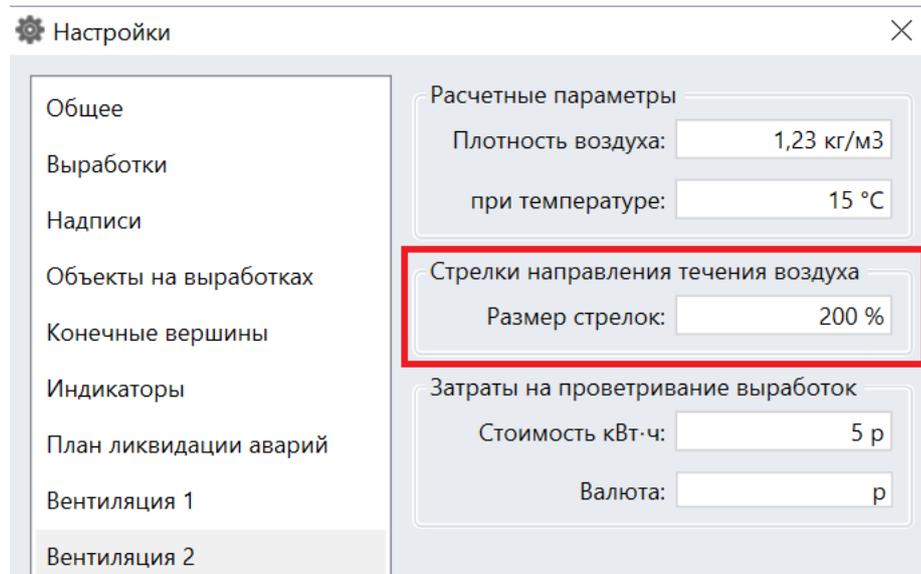
В этом случае можно дополнительно подсветить направления самих выработок (*Вид -> Общее -> Выработки -> Выработки -> Направления*), чтобы иметь возможность интерпретировать положительную или отрицательную величину расходов.



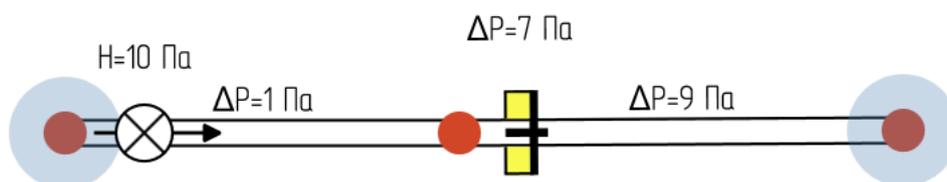
Однако самым удобным способом является включение режима подсветки направлений модельных расходов (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Направления движения воздуха*). В этом случае модельные расходы всегда отображаются положительными величинами.



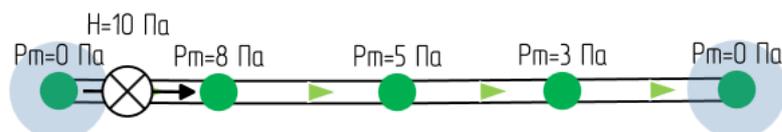
Размер стрелок направления течения воздуха можно задавать в настройках.

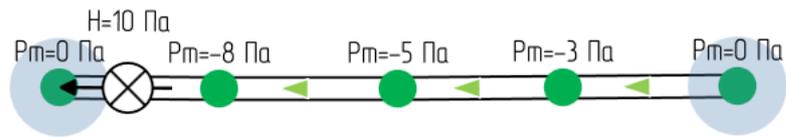


Кроме того, важно понимать, как расходуется напор, создаваемый вентилятором, при движении воздуха по выработкам. Для этого предусмотрены режимы отображения падения давления в выработках (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки (индикаторы) -> Перепады давления*) и на отдельных перемычках (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Объекты на выработках (индикаторы) -> Перепады давления на перемычках*).

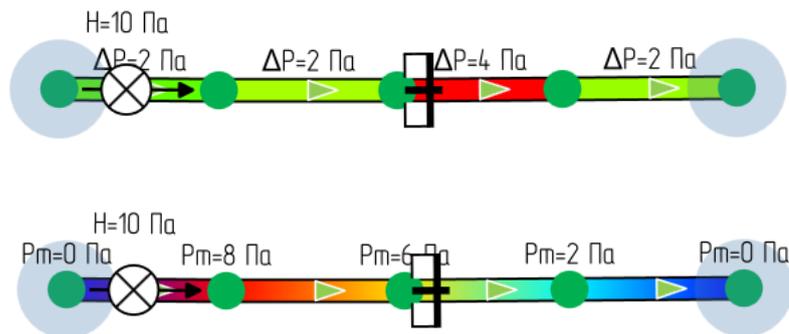


Иногда требуется знать не перепады давления, а абсолютные значения давления в отдельных точках на схеме. К примеру, это бывает особенно важно, когда требуется оценить возможный перепад давления, если между искомыми точками построить новую выработку. Для таких случаев предусмотрен режим отображения абсолютных значений давления воздуха в узлах выработок (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Конечные вершины (индикаторы) -> Модельное давление*). При этом считается, что в узлах, связанных с атмосферой, нулевое абсолютное давление. Если вентилятор работает на всас, то в узлах будут отображаться положительные давления, а если наоборот – отрицательные.



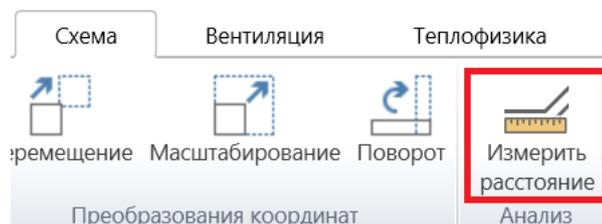


При этом те же самые данные можно дополнить соответствующей градиентной заливкой (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Распределение перепадов давления Вид -> .Модельные данные -> Выработки -> Распределение давления). В случае перепадов давления в красный цвет будут закрашиваться те выработки, где давление меняется больше всего, а в случае абсолютных давлений – выработки, где давление достигает максимальных значений.

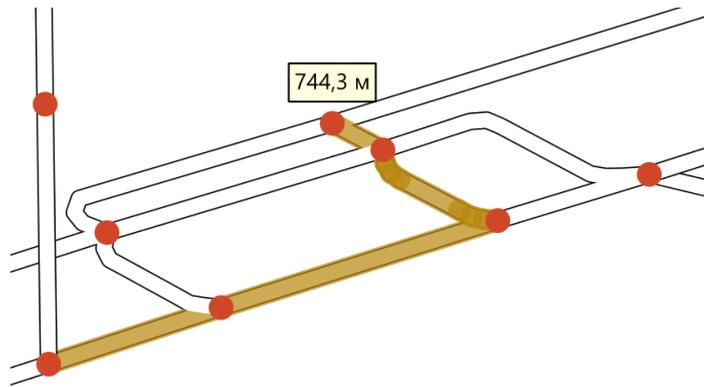


Измерения на схеме

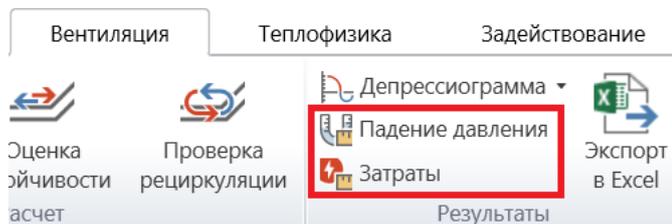
Некоторые модельные данные можно получить не только для конкретной выработки, а и для любой последовательности выработок на схеме. Прежде всего, таким образом можно измерять расстояния. Для этого на вкладке *Схема* предусмотрена команда *Измерить расстояние*.



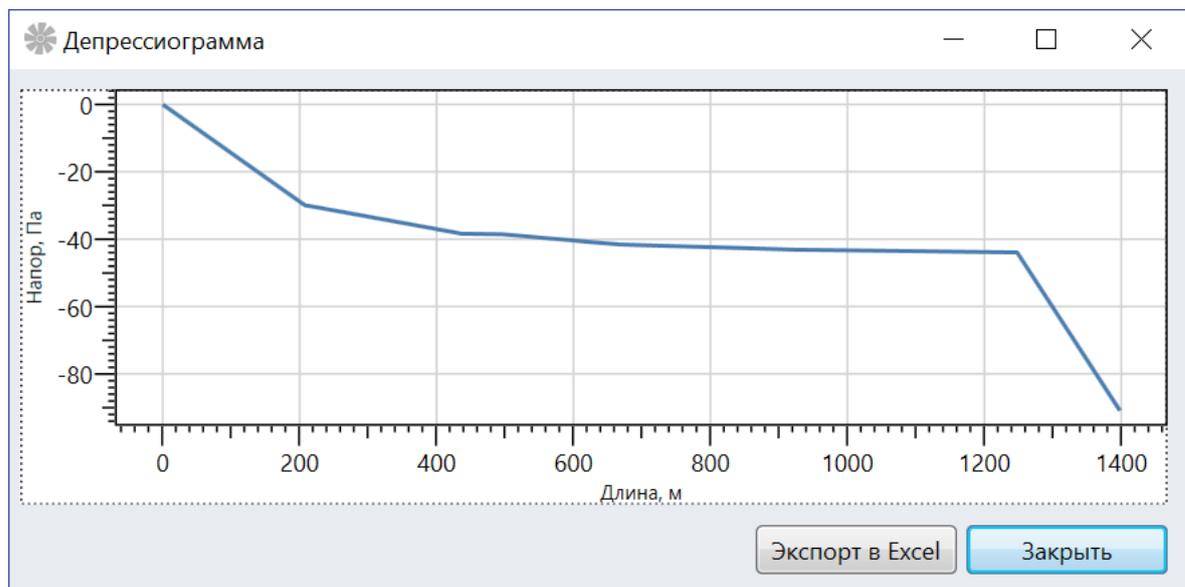
После нажатия на эту кнопку пользователь должен выбрать путь на схеме, последовательно щелкая по выработкам. Отменять добавление выработок можно правой кнопкой мыши. В результате на схеме будет подсвечиваться длина выбранного пути.



Аналогичным образом можно измерять падение давления и затраты на проветривание вдоль выбранного пути при помощи команд на вкладке *Вентиляция*.

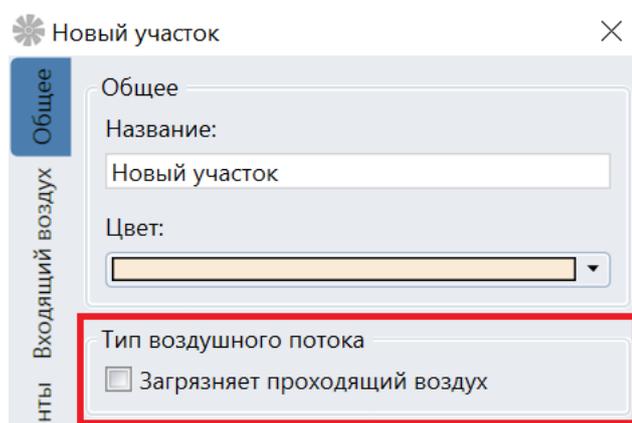


Кроме того, команда *Депрессиограмма* по итогам построения пути на схеме позволяет построить график падения давления и экспортировать его в Excel.



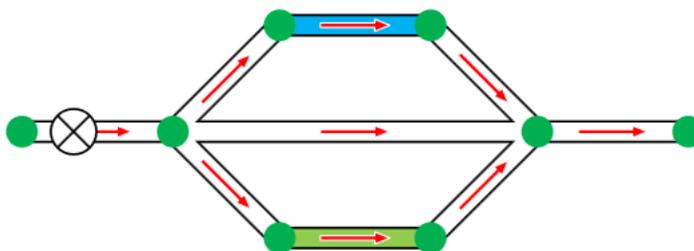
Определение типов воздушных потоков

Очень важно знать, по каким выработкам движется свежая струя воздуха, а по каким уже использованная. По умолчанию при отображении направления течения воздуха всегда показывается свежая струя (красная стрелка). Чтобы это изменить, следует пометить те места на схеме, в которых свежий воздух становится использованным. Делается это в свойствах участка рудника путём задания галочки «Загрязняет проходящий воздух».

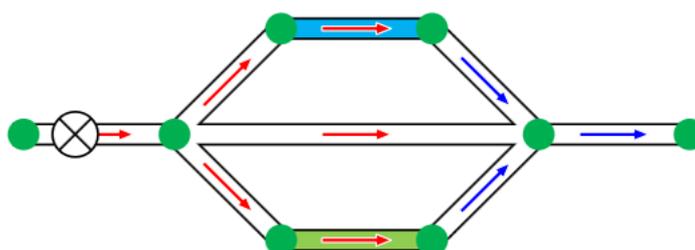


В этом случае воздух, прошедший через выработки, привязанные к этому участку, будет считаться использованным.

Рассмотрим следующую вентиляционную схему. Синим и зелёным отмечено расположение двух рабочих зон.



На этой схеме воздух во всех выработках считается свежим. Но если пометить, что обе рабочие зоны загрязняют проходящий через них воздух, то вентиляционная сеть будет выглядеть следующим образом.

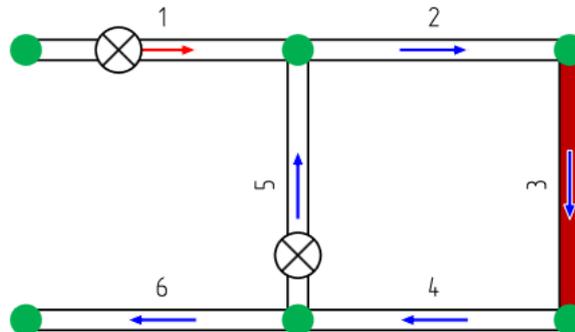


При этом считается, что при смешивании свежего воздуха с использованным в результате получается использованный воздух. Однако иногда это бывает не так. К примеру, при организации рециркуляционного проветривания использованный воздух подмешивается к свежему, но тем не менее результирующая струя по-прежнему считается свежей. В этом случае алгоритм определения типа воздушных потоков следует поправить, указав в свойствах соответствующих выработок, что воздушный поток в них следует всегда считать свежим (вкладка *Вентиляция* на панели свойств выработки).

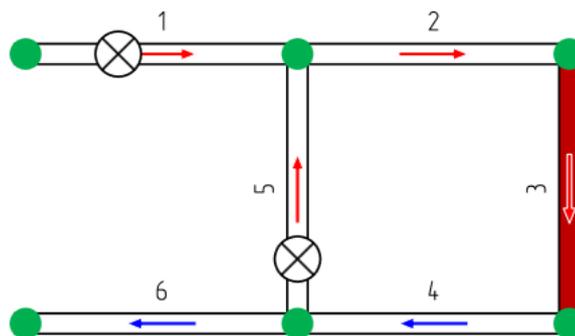
Воздушная струя

Тип:

Рассмотрим следующую вентиляционную схему, в которой рабочая зона в третьей выработке проветривается с использованием рециркуляции.



В этом случае воздушный поток во второй выработке будет считаться использованным. Чтобы это изменить, достаточно указать, что в пятой выработке всегда должен идти только свежий воздух.



Проверка режимов работы вентиляторов

Что касается вентиляторов, то прежде всего следует проверять установившийся режим их работы. Для этого на панели свойств вентилятора предусмотрено отображение текущего расхода воздуха на вентиляторе, развиваемого им напора и потребляемой мощности. Кроме того, там же отображается и КПД работы вентилятора, вычисляемый по следующей формуле.

$$\eta = \frac{Q \cdot H(Q)}{W(Q)} \cdot 100$$

η – КПД вентилятора в процентах

Q – расход воздуха на вентиляторе

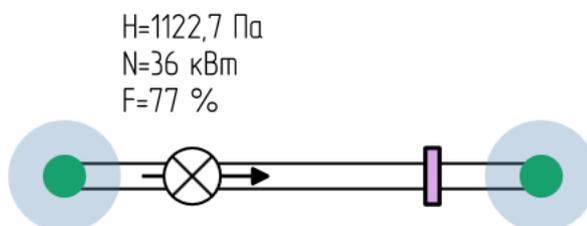
$H(Q)$ – напор вентилятора при текущем расходе

$W(Q)$ – потребляемая мощность при текущем расходе

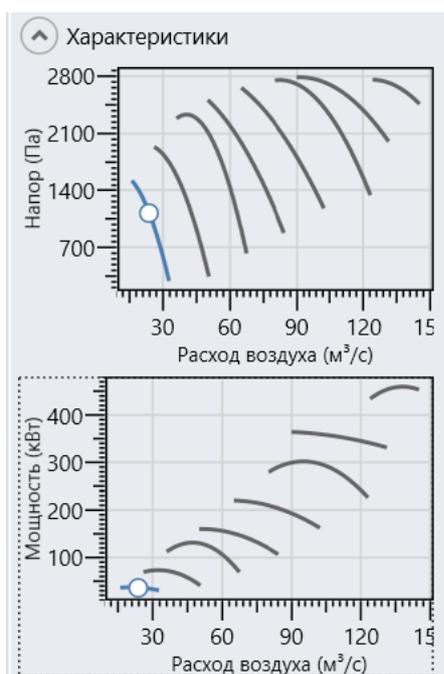
Параметры	
Q выруб:	23,9 м ³ /с
Q вент:	23,9 м ³ /с
Напор:	1123 Па
Мощность:	36 кВт
КПД:	77 %
Диаметр:	1,7 м

При этом расход в выработке («Q выруб») и расход в вентиляторе («Q вент») отображаются отдельно, так как они могут не совпадать в случае эжекторной установки.

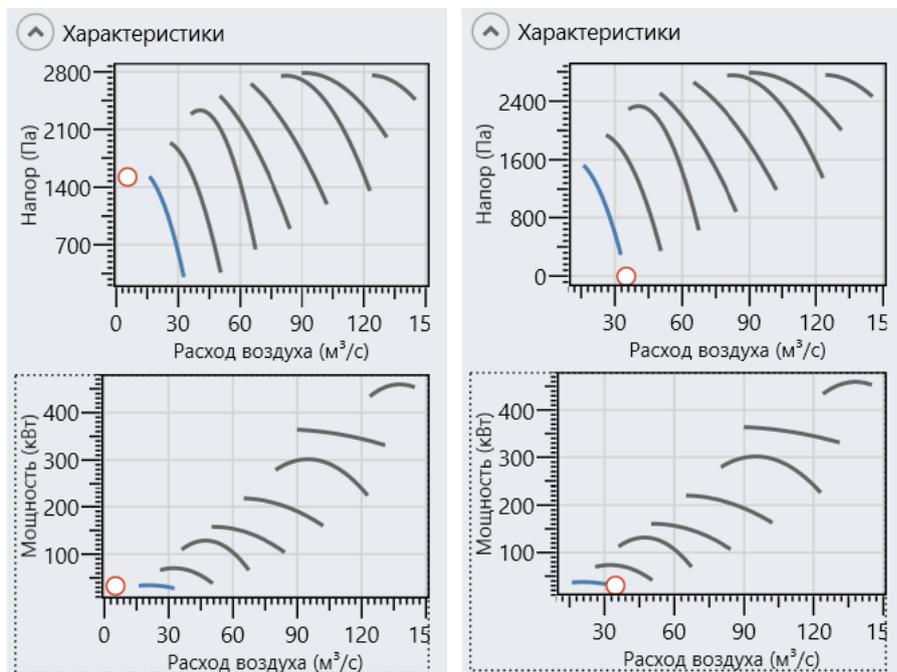
Те же самые параметры можно отображать при помощи соответствующих индикаторов (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Объекты на выработках (индикаторы) -> Напоры вентиляторов, Мощности вентиляторов, КПД вентиляторов).



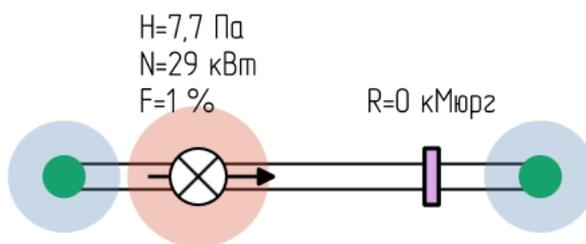
Кроме того, важно проверять, работает ли вентилятор в допустимом режиме или нет. Для этого на панели свойств на напорной и мощностной характеристике для выбранного угла лопаток (данная линия подсвечивается синим) отображается так называемая рабочая точка вентилятора, которая соответствует текущему расходу.



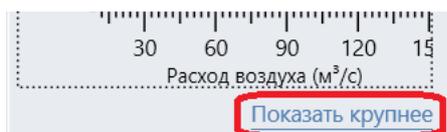
Если текущий расход находится в пределах между минимальным и максимальным допустимым значениями, заданными для выбранной характеристики, то рабочая точка закрашивается синим. В противном случае рабочая точка подсвечивается красным, сигнализируя, что вентилятор работает в режиме помпажа, либо он работает на недопустимо большом расходе.



Для быстрой визуальной проверки режима работы вентилятора следует включить подсветку вентиляторов, работающих в недопустимом режиме (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Объекты на выработках -> Вентиляторы в нерабочем режиме*).



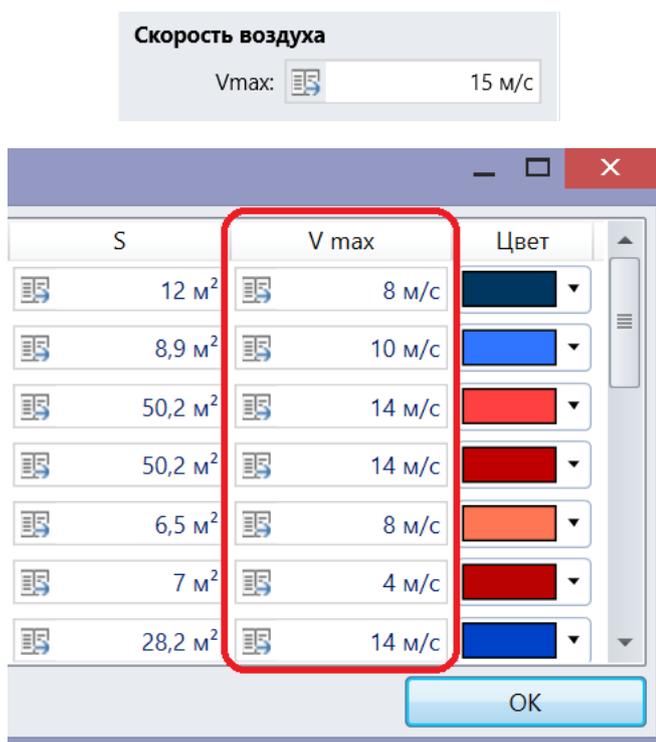
Кроме того, графики с напорными и мощностными характеристиками для выбранного вентилятора можно открыть в отдельной форме при помощи кнопки *Показать крупнее*.



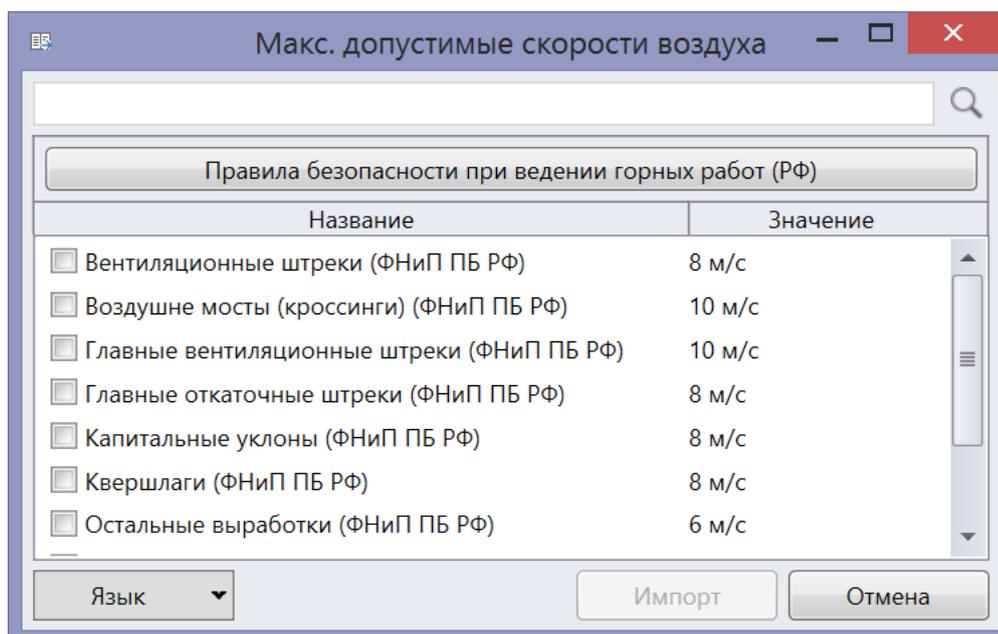
В таком случае станет возможно следить за изменением режима работы вентилятора без необходимости открывать панель с его свойствами.

Проверка скоростей течения воздуха в выработках

Помимо самих модельных расходов важно также проверять скорости течения воздуха в выработках, так как требования безопасности накладывают ограничения на максимальные скорости движения воздуха в различных категориях выработок. Такие ограничения можно указывать как у конкретных выработок, так и в редакторе типов выработок.



Сами значения максимальных скоростей доступны в справочнике, открываемом при помощи кнопки рядом с полем.



Если же требуется убрать проверку максимальной скорости движения воздуха в выработке, то это поле можно оставить пустым.

Модельную скорость течения воздуха в выработке можно найти на панели свойств выработки.

Вычисленные параметры	
Спротив-ие:	0,00046 кМюрг
Расход:	74,3 м ³ /с
V воздуха:	7,4 м/с

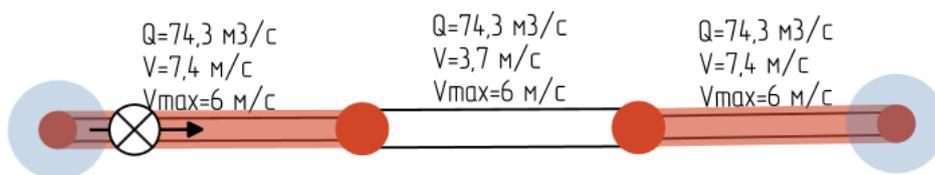
При этом модельная скорость течения воздуха в выработке V вычисляется по следующей формуле.

$$V = \frac{Q}{S}$$

Q – расход воздуха в выработке

S – площадь поперечного сечения выработки.

Если же требуется просматривать текущие модельные скорости сразу у многих выработок на схеме, то следует включить отображение соответствующего индикатора (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки (индикаторы) -> Скорости воздуха*). Кроме того, для более простого визуального поиска выработок, в которых превышена максимальная допустимая скорость течения воздуха, предусмотрен специальный режим подсветки таких выработок (*Вид -> Модельные данные -> Выработки -> Превышение макс. скорости воздуха*).



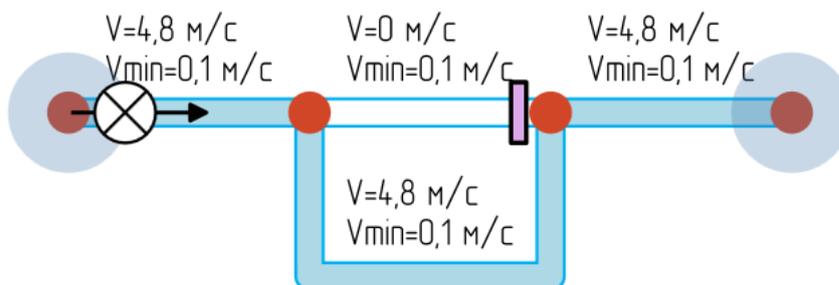
Помимо ограничения максимальной скорости правила безопасности накладывают ограничение и на минимальную скорость движения воздуха в проветриваемой выработке. При этом минимальная допустимая скорость течения воздуха в выработке V_{min} рассчитывается по следующей формуле.

$$V_{min} = 0.1 \cdot \frac{P}{S}$$

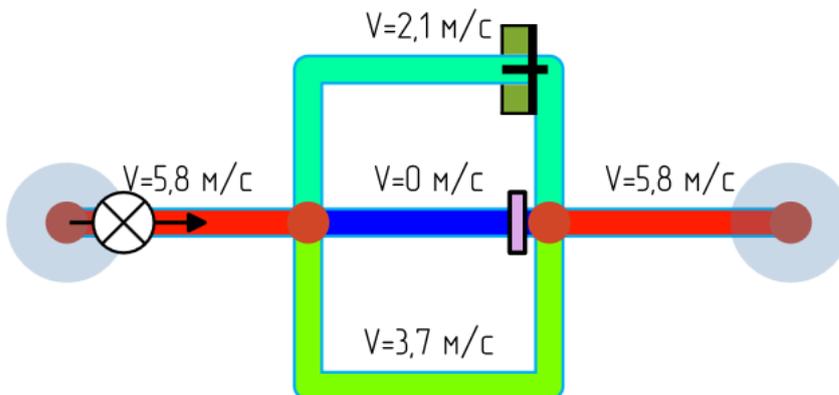
P – периметр поперечного сечения выработки

S – площадь поперечного сечения выработки

Значение минимальной скорости у выработок на схеме можно узнать, включив отображение соответствующего индикатора (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Выработки (индикаторы) -> Мин. допустимая скорость воздуха*). Кроме того, для более простой проверки превышения модельной скорости воздуха над минимально допустимой можно включить подсветку проветриваемых выработок (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Проветриваемые выработки*).



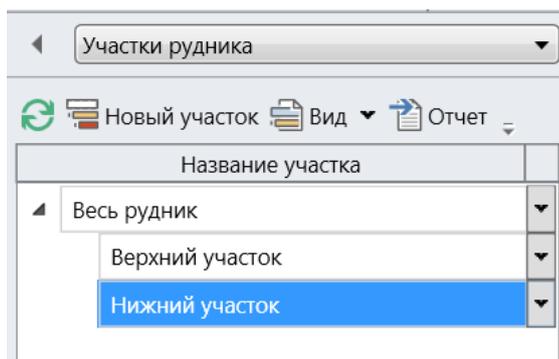
Если же требуется визуально сравнить скорости течения воздуха между собой в различных выработках на схеме, то это можно сделать, включив отображение градиента скоростей воздуха (*Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Распределение скоростей воздуха*). В этом случае выработки с большой скоростью воздуха будут закрашиваться красным, а с маленькой – синим.



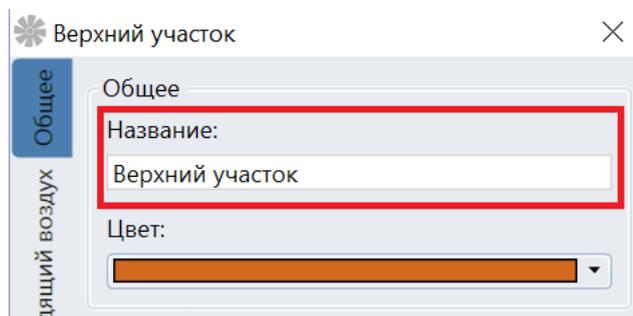
Расчёт количества воздуха на участках и определение утечек

Одной из целей проектирования рудничной вентиляции является обеспечение подачи нужного количества воздуха в рабочие зоны с минимальными утечками. Однако результатом работы алгоритма стационарного воздухораспределения являются индивидуальные расходы на выработках. Поэтому в тех случаях, когда воздух на рабочие зоны подаётся по нескольким воздухоподающим выработкам, определение того, является ли общее количество воздуха достаточным, становится затруднительным. В этом случае удобно построить дерево участков, из которых состоит рудник, и смотреть

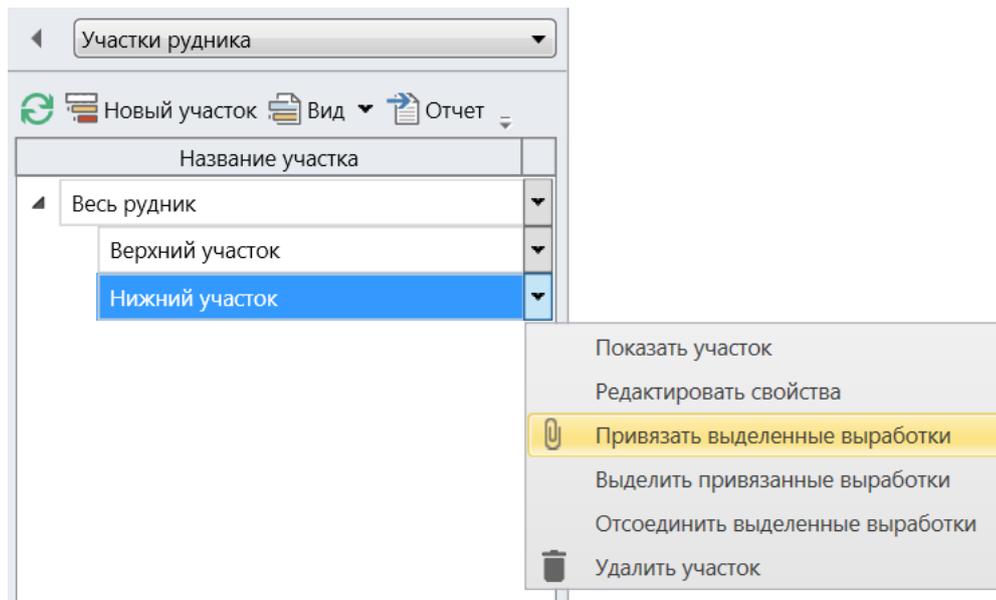
общее количество входящего воздуха уже там. Сделать это можно на вкладке *Участки рудника* на *Боковой панели*.



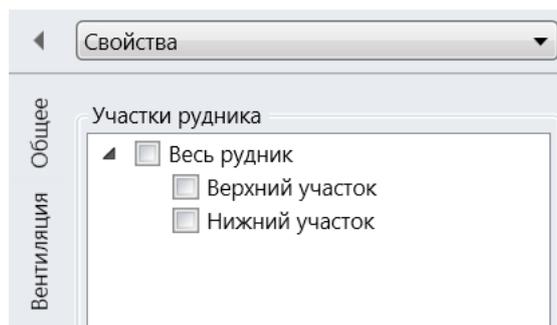
Чтобы создать новый участок, достаточно нажать кнопку *Новый участок*, после чего этот участок станет дочерним у выделенного в данный момент элемента дерева. Если ни один из участков не был выделен, то новый участок будет помещён наверх. Если позже появится необходимость перестроить иерархию, то это всегда можно сделать, перетаскивая элементы дерева по технологии Drag&Drop. Если же требуется изменить название участка, то это можно сделать в специальной форме, открывающейся по двойному клику на участке.



Каждый участок связан с некоторым множеством выработок на схеме. Чтобы указать, какие это выработки, следует воспользоваться командами *Привязать выделенные выработки* и *Отсоединить выделенные выработки* в контекстном меню соответствующего участка. После этого выработки, относящиеся к участку, можно выделить на схеме или подсветить, наведя мышь на соответствующий элемент дерева.

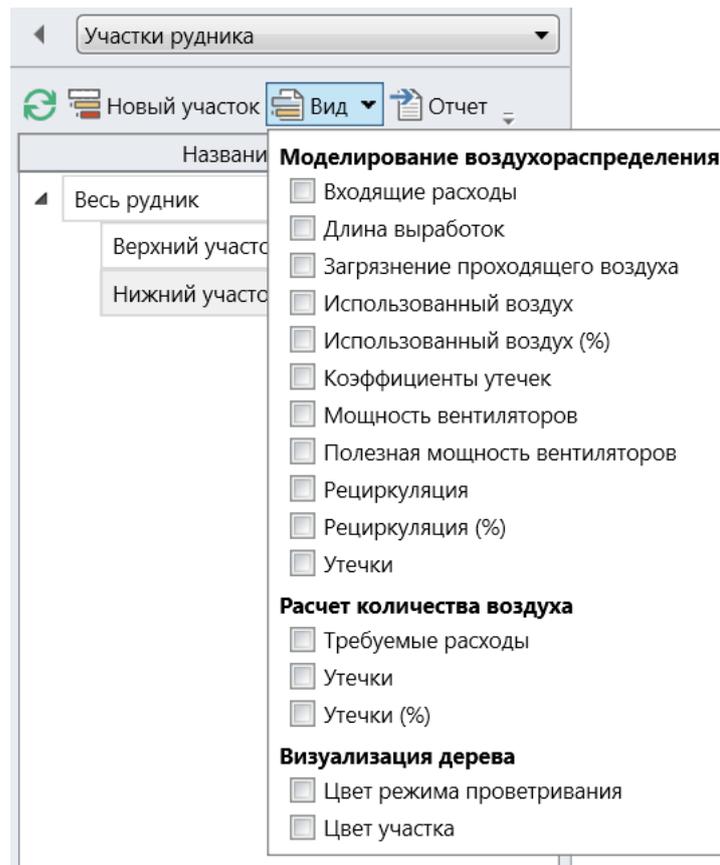


Кроме того, привязать выработку к участку можно на вкладке *Участки* на панели свойств самой выработки.



Однако для более простого определения принадлежности выработок к участкам полезно включить отображение цвета участков на схеме (*Вид -> Общее -> Выработки -> Выработки -> Цвет участка на границах / внутри*).

Когда дерево участков построено, в нем можно отобразить различные свойства участков. К примеру, можно добавить индикатор с входящим модельным расходом на участке. Для этого следует воспользоваться меню *Вид*. После чего в открывшемся окне нужно выбрать список отображаемых индикаторов, а также иные настройки визуализации, например, закрашивание элементов дерева в цвет участков.



Входящий модельный расход рассчитывается как сумма модельных расходов в связанных с участком выработках, по которым воздух движется внутрь этого участка. Что же касается утечек, то они вычисляются как разность между входящим модельным расходом участка-контейнера и суммой входящих модельных расходов его дочерних участков. Однако расчёт утечек иногда приходится корректировать с учётом того, что некоторые рабочие зоны могут проветриваться последовательно, а на некоторых из них воздух может рециркулировать. Поэтому в общем случае $Q_{\text{утечек}}$ вычисляется по следующей формуле.

$$Q_{\text{утечек}} = Q_{\text{родителя}} - \sum_i Q_{\text{участка}}^i \cdot (1 - (K_{\text{рециркуляции}}^i + K_{\text{чужого}}^i))$$

$Q_{\text{утечек}}$ – расход, соответствующий утечкам, на участке-родителе.

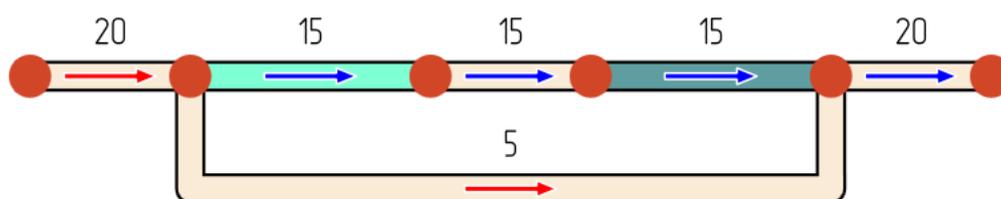
$Q_{\text{родителя}}$ – входящий модельный расход на участке-родителе.

$Q_{\text{участка}}^i$ – входящий модельный расход на i -ом участке.

$K_{\text{рециркуляции}}^i$ – доля входящего расхода на i -ом участке, поступающего за счёт рециркуляции (от нуля до единицы).

$K_{\text{чужого}}^i$ – доля входящего расхода на i -ом участке, поступающего с других участков в том же родительском участке (от нуля до единицы).

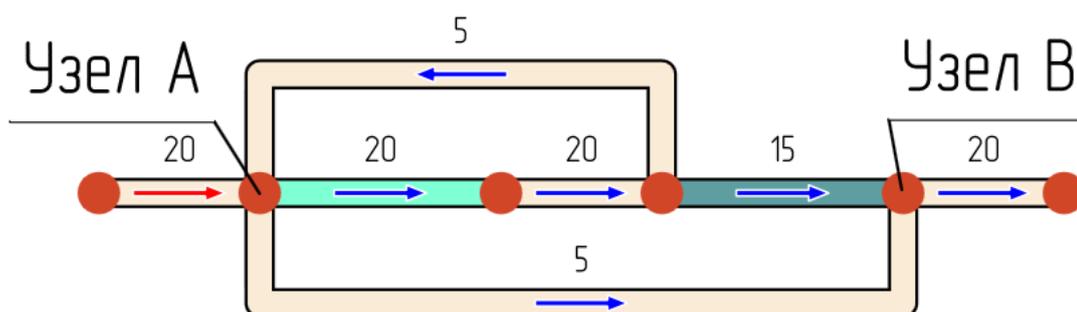
Рассмотрим простой пример последовательного проветривания двух участков.



Участки рудника						
Название участка	Q вх	Цикл	Цикл %	Исп	Исп %	Утечки
Весь рудник	20	0	0	0	0	5
Участок 1	15	0	0	0	0	0
Участок 2	15	0	0	15	100	0

В этом случае воздух, входящий на второй участок, будет считаться использованным на первом участке (то есть $K_{\text{чужого}}^2 = 1$), что приведет к исключению входящего расхода на втором участке из расчёта утечек.

Пусть теперь часть воздуха на первом участке возвращается назад через рециркуляцию.



Участки рудника						
Название участка	Q вх	Цикл	Цикл %	Исп	Исп %	Утечки
Весь рудник	20	0	0	0	0	4
Участок 1	20	4	20	0	0	0
Участок 2	15	0	0	15	100	0

В этом случае коэффициент рециркуляции на первом участке будет составлять 20 процентов, что означает, что из 20 единиц воздуха на первом участке к нему назад возвращается 4 (а не 5, так как 1 уходит к узлу А – В). В таком случае по выработке А – В из 5 единиц воздуха одна единица будет приходиться на воздух из первого участка, а значит на общие утечки останется только 4 единицы.

В реальности схема проветривания может быть ещё сложнее. Контуров рециркуляции может быть несколько, а к использованному воздуху на входе может подмешиваться свежий. В таких случаях автоматический расчёт утечек становится незаменимым.

Кроме того, помимо утечек по модельным расходам можно вычислить так называемый коэффициент утечек $K_{\text{утечек}}$.

$$K_{\text{утечек}} = \frac{Q_{\text{входящий}}}{Q_{\text{входящий}} - Q_{\text{утечки}}}$$

$Q_{\text{входящий}}$ – входящий модельный расход на участке.

$Q_{\text{утечки}}$ – расход, соответствующий утечкам на участке.

Вычислив этот коэффициент для всех участков рудника по модельным расходам, основанным на замерах, выполненных в ходе проведения воздушно-депресссионной съёмки, можно обоснованно использовать эти коэффициенты и при расчёте требуемого количества воздуха даже в случае использования других схем проветривания, использующих ту же топологию выработок.

Участки рудника	
Название участка	К утеч
Весь рудник	1,25
Участок 1	1
Участок 2	1

Сами значения необходимых расходов можно задавать в свойствах участка. В этом случае, если значение суммарного входящего расхода окажется меньше требуемого, то значение минимального расхода будет подсвечено красным цветом.

Нижний участок

Общее

Название: Нижний участок

Цвет: [Blue]

Тип воздушного потока

Загрязняет проходящий воздух

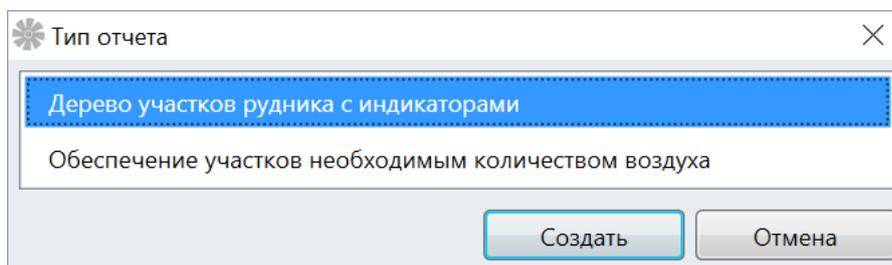
Расчет количества воздуха

Требуемый расход: 20 м³/с

Задается вручную

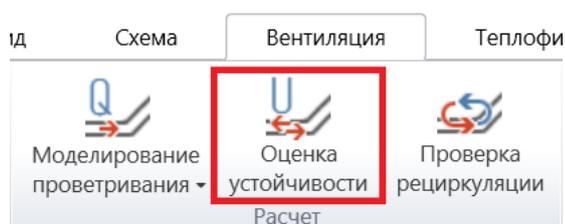
Участки рудника		
Название участка	Q вх	Q мин
Новый участок	18,2	20

Для удобства оформления проектной документации текущее представление дерева участков вместе с индикаторами можно экспортировать в Excel, воспользовавшись командой *Отчёт* и выбрав тип отчёта *Дерево участков рудника с индикаторами*.



Проверка устойчивости

Одним из важных вопросов, возникающих в процессе проектирования, является то, насколько можно доверять вычисленным расходам воздуха в выработках. Дело в том, что самой трудной и подверженной ошибкам является задача определения аэродинамических сопротивлений выработок, но в зависимости от топологии некоторые расходы почти не зависят от точности измерения аэродинамического сопротивления отдельных выработок, а расходы на других могут меняться очень сильно, вплоть до изменения направления движения воздуха в зависимости от аэродинамического сопротивления соседних выработок. Так, например, расходы в выработках-сбоях, соединяющих серию параллельно идущих выработок, могут менять направление в зависимости от соотношения давлений в местах соединения, которое обычно очень мало и может измениться на противоположное даже при малой вариации сопротивления одной из выработок. В этом случае величине и направлению расходов на таких сбоях доверять нельзя. Если же рассматривать расходы, например, на воздухоподающих стволах, то в этом случае погрешности в измерении аэродинамического сопротивления отдельных выработок почти никак не будут отражаться на величине, а уж тем более на направлении расходов. Чтобы как-то отделить выработки с независимыми от топологии расходами, от выработок, чьи расходы определяются ограниченным набором аэродинамических сопротивлений соседей, существует алгоритм проверки устойчивости расходов.

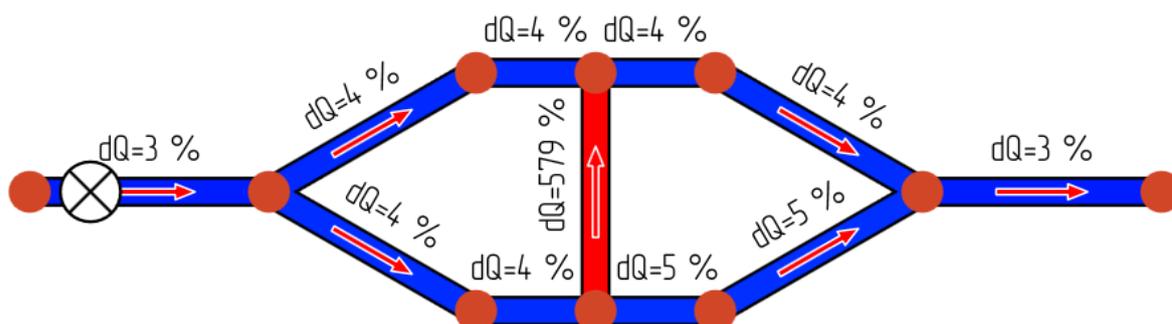


Для этого выполняется серия последовательных расчётов стационарного воздухораспределения, со случайным изменением аэродинамических сопротивлений каждой выработки на величину $\pm 33\%$ на каждой итерации. Затем для каждой выработки

вычисляется среднее значение расхода и отношение данной величины к текущему расходу в выработке считается равным вариации расхода. Для выработок, у которых случайные изменения аэродинамических сопротивлений соседней будут компенсировать друг друга, отклонения расходов будут меньше 30-50%. Расходы же, у которых отклонение превышает 100%, не могут считаться достоверными.

Вычисленные параметры	
Сопротив-ие:	0,0045 Н.с2/м8
Расход:	5,9 м3/с
V воздуха:	0,6 м/с
Отклонение:	9 %

Вычисленное значение отклонения расхода в выработке отображается на панели её свойств. Есть также возможность включить отображение соответствующего индикатора на схеме (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки (индикаторы) -> Отклонения расходов). Для более простого поиска выработок с большими отклонениями расходов полезно дополнительно включить специальную подсветку (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Распределение отклонений расходов).



Так, например, на вышеприведённой схеме у центральной выработки-сбойки отклонение расхода составило 579 %, и соответствующая выработка была закрашена красным. Это произошло вследствие того, что расход в этой выработке в силу общей топологии сети получился близким к нулю и при этом очень сильно зависел от соотношения аэродинамических сопротивлений соседних выработок, поэтому доверять вычисленному модельному расходу в этой выработке нельзя.

Важно также знать не просто то, насколько могут колебаться модельные расходы, но и то, сохраняют ли они при этом своё направление. Для этого при оценке устойчивости воздухораспределения вычисляются так называемые гарантированные расходы, то есть расходы, которые больше всего отклонились в обратном направлении вследствие колебания сопротивления соседних выработок. Для отображения гарантированных расходов есть специальный индикатор (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные ->

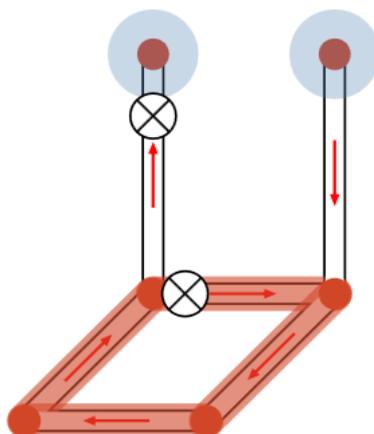
Выработки (индикаторы) -> Гарантированные расходы) и режим подсветки (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Распределение гарантированных расходов). В случае если направления модельных расходов совпадали с направлениями выработок, то отрицательная величина гарантированного расхода будет означать, что направлению расхода доверять нельзя.

Поиск рециркуляционных контуров

Одним из важных параметров обеспечения безопасного проветривания рудника является отсутствие (или в некоторых случаях – строгий контроль) рециркуляционных контуров. Рециркуляционный контур – это последовательность выработок, по которым исходящий загрязнённый воздух смешивается с чистым входящим воздухом. Если сеть выработок очень большая, то найти такие контуры становится очень проблематично. Специально для этих случаев предусмотрен алгоритм поиска и подсветки рециркуляционных контуров (команда *Проверка рециркуляции* на вкладке *Вентиляция*).



После нажатия на эту кнопку будет отображено сообщение с общим количеством найденных контуров, и, если таковые будут найдены, будет включён режим их подсветки (Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Рециркуляционные контуры).



Вычисление затрат на проветривание выработок

Полезно также знать не только распределение напора, создаваемого вентилятором, но и распределение его мощности, т.е. какая доля мощности вентилятора затрачивается на

проветривание каждой из выработок. При этом для вычисления мощности W , необходимой для проветривания каждой выработки, используется следующая формула.

$$W = g \cdot R_{full} \cdot Q^3$$

g – ускорение свободного падения

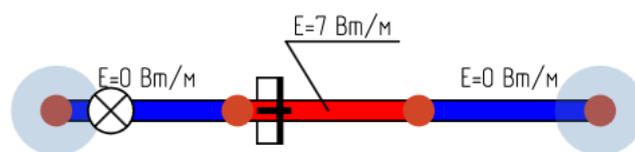
R_{full} – полное аэродинамическое сопротивление выработки (вместе с сопротивлением перемычек)

Q – расход воздуха в выработке

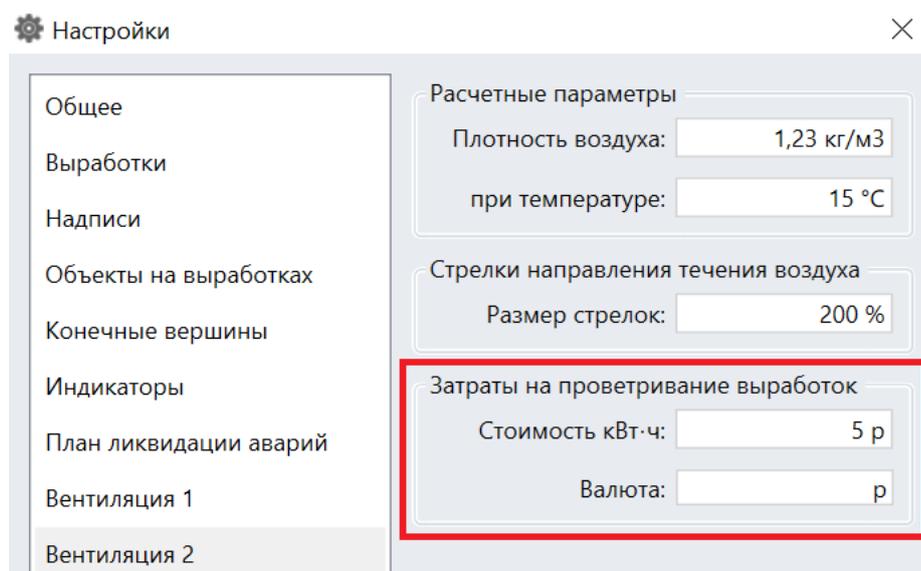
Энергозатраты на проветривание выработки можно посмотреть на панели её свойств.

Вычисленные параметры	
Сопротив-ие:	0,0045 Н.с2/м8
Расход:	5,9 м3/с
V воздуха:	0,6 м/с
Отклонение:	9 %
ΔP:	0 Па
Энергозат-ы:	1 Вт

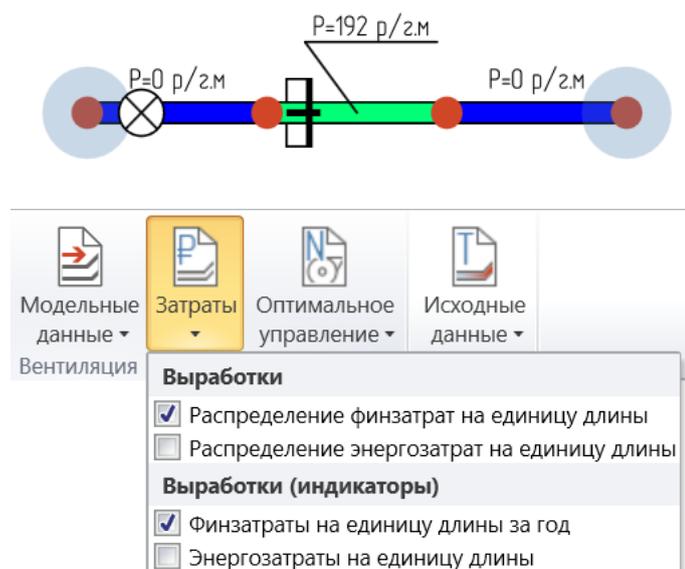
Кроме того, распределение энергозатрат на схеме удобно визуализировать путём включения соответствующего индикатора (*Вид -> Вентиляция -> Затраты -> Выработки (индикаторы) -> Энергозатраты на единицу длины*) и градиентной заливки (*Вид -> Вентиляция -> Затраты -> Выработки -> Распределение энергозатрат на единицу длины*), при которой красным будут закрашиваться выработки с наибольшими энергозатратами на проветривание.



Если к тому же известна стоимость киловатт-часа электроэнергии, то затраты на проветривание каждой выработки легко перевести в денежный эквивалент. Стоимость одного киловатт-часа и название валюты задаются в настройках (*Настройки -> Вентиляция 2 -> Затраты на проветривание выработок*).



После чего ту же информацию можно представить в виде финансовых затрат на проветривание каждой выработки в течение года (*Вид -> Вентиляция -> Затраты -> Выработки (индикаторы) -> Финзатраты на единицу длины за год и Вид -> Вентиляция -> Затраты -> Выработки -> Распределение финзатрат на единицу длины*).



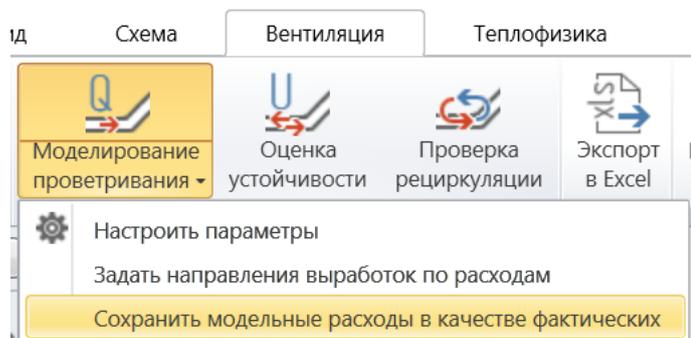
Задание направлений выработок по модельным расходам

После проведения расчёта стационарного воздухораспределения бывает полезным привести направления выработок в соответствие с направлением модельных расходов. В этом случае все расходы станут положительными величинами, а, кроме того, некоторые алгоритмы могут предполагать, что воздух движется именно вдоль направления выработок.



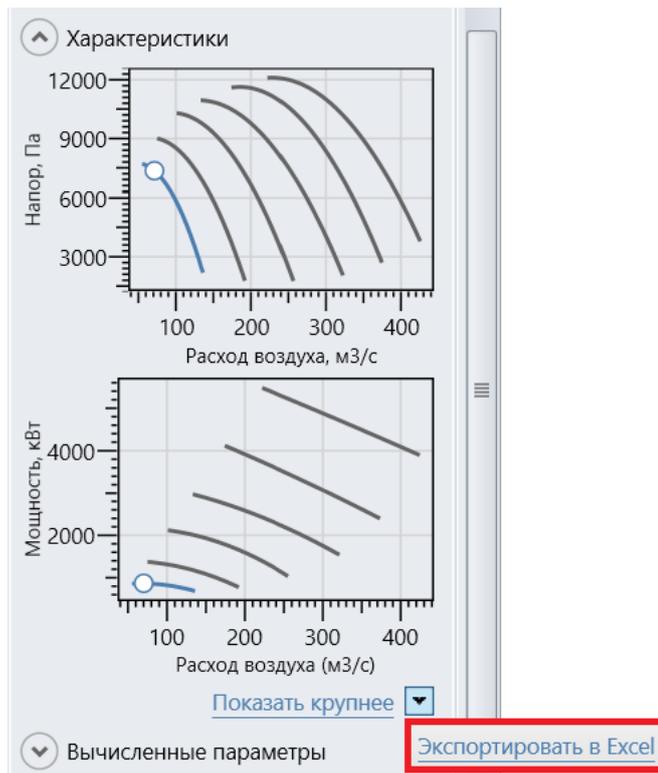
Сохранение модельных расходов в качестве фактических

Чаще всего данные обрабатывается в следующей последовательности. Сначала происходит обработка данных воздушно-депрессивной съёмки, на основе которых определяются фактические расходы и перепады давления в выработках. Это позволяет вычислить полные аэродинамические сопротивления выработок. В итоге после установки вентиляторов на схеме становится возможным проведение расчёта стационарного воздухораспределения и вычисление модельных расходов. Однако иногда полученные модельные расходы бывает необходимо сохранить снова в качестве фактических расходов так, как будто они были получены в результате проведения воздушно-депрессивной съёмки. Самым простым примером, когда это может понадобиться, является использование фактических расходов в теплофизическом расчёте без последующего пересчёта модельных расходов.

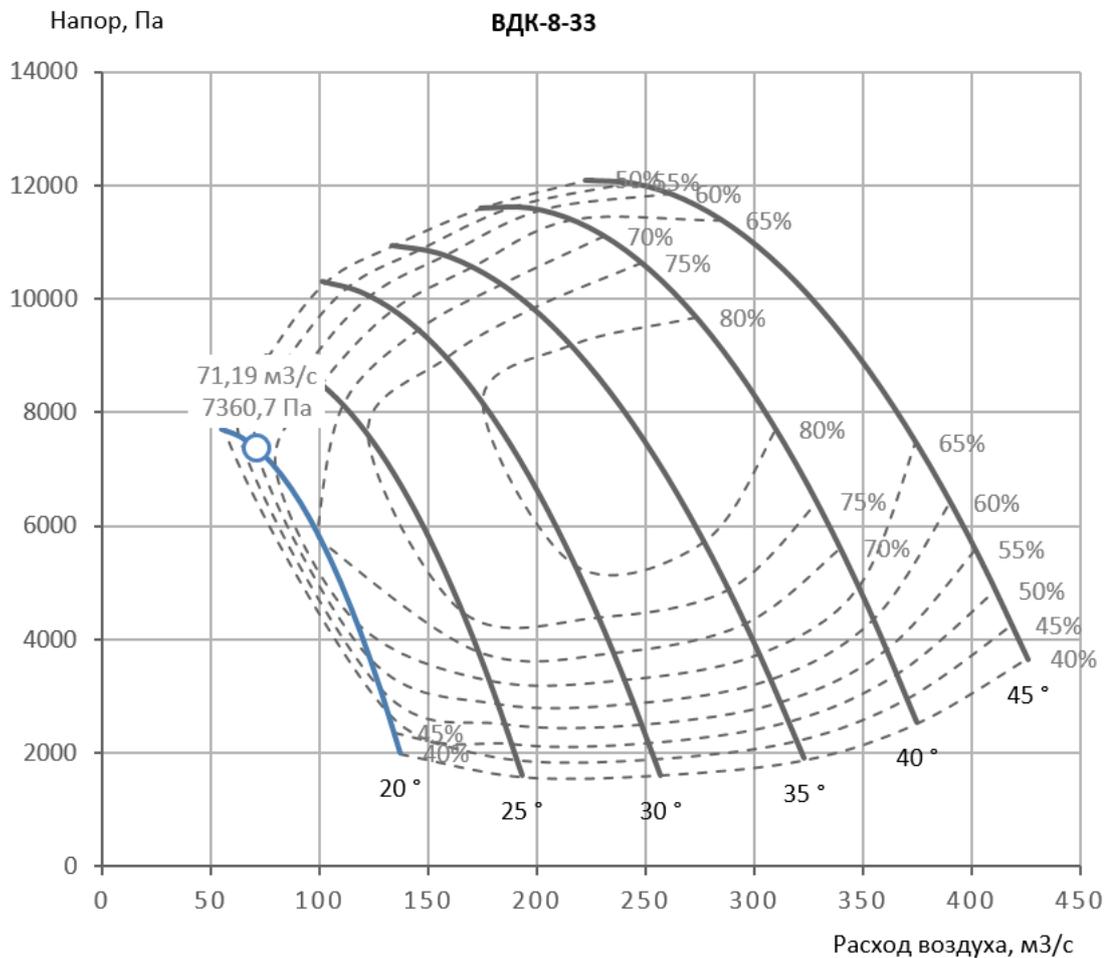


Экспорт вентилятора в Excel

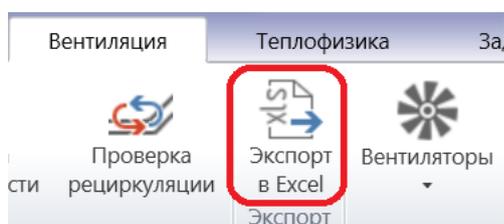
График напорной характеристики вентилятора может быть экспортирован в виде диаграммы Excel, удобной для вставки в отчёты. Для этого предусмотрена команда *Экспортировать в Excel* на панели со свойствами вентилятора.



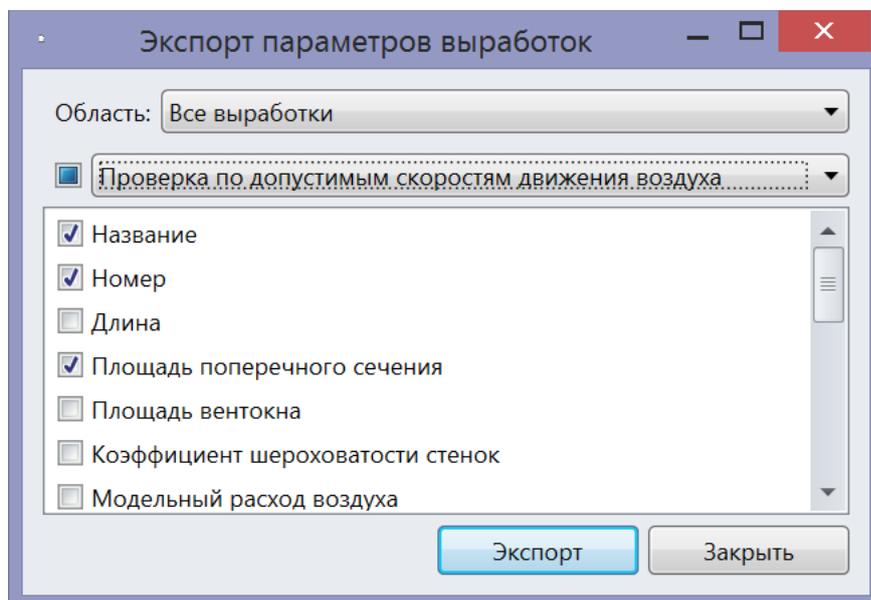
В результате будут экспортированы все напорные характеристики, будет помечена рабочая точка, а также нарисованы линии КПД.



Когда все расчёты закончены, наступает момент оформления принятых проектных решений в области вентиляции. Делается это чаще всего путём создания соответствующих отчётов, в которых решения описываются в текстовом виде и иллюстрируются необходимыми табличными данными, а также графическими схемами. Что касается табличных данных, то это чаще бывают разного рода вентиляционные параметры выработок. Для удобства представления таких данных в табличном виде в Excel, откуда их легко можно копировать, существует специальная кнопка на вкладке *Вентиляция*.

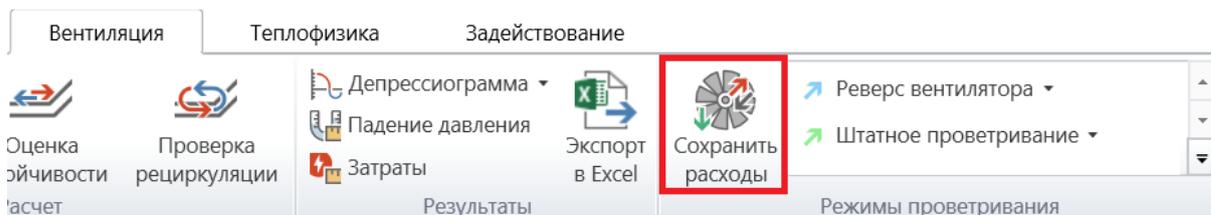


После нажатия на эту кнопку открывается окно, в котором предлагается выбрать, какие из предлагаемых параметров следует экспортировать в Excel. Так как параметров при этом отображается достаточно много, то проще всего сначала снять выделение со всех элементов, нажав галочку сверху, а уже потом начать выделять нужные параметры в списке. Кроме того, в этом же окне можно указать, что экспорту подлежат параметры только определённых выработок на схеме. Так, например, можно задать, что экспортироваться должны только видимые выработки или же только выработки, выделенные в данный момент на схеме. Удобным также бывает выбор не индивидуальных экспортируемых параметров, а сразу целого стандартного набора таких параметров.



Сохранение режимов проветривания

Проектирование вентиляции обычно подразумевает выбор оптимального варианта проветривания из многих возможных. В таких случаях полезно сохранять все такие варианты, чтобы иметь возможность быстро переключаться между ними. Для этих целей на вкладке *Вентиляция* предусмотрен список режимов проветривания. При помощи кнопки *Сохранить расходы* текущие модельные расходы выработки будут сохранены в этом списке под заданным пользователем именем.



Позже сохраненные расходы в выработках можно восстановить без выполнения расчета простым щелчком мыши по соответствующему элементу списка.

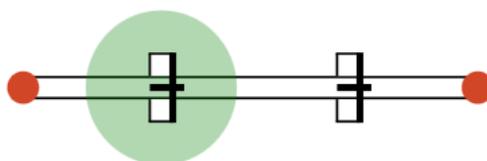
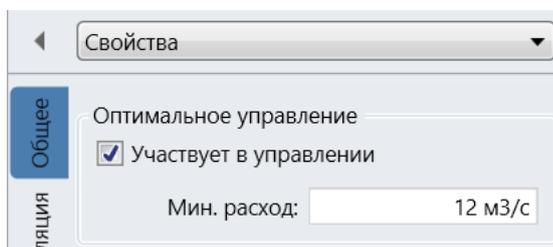
Оптимальное управление

Выбор объектов, участвующих в управлении

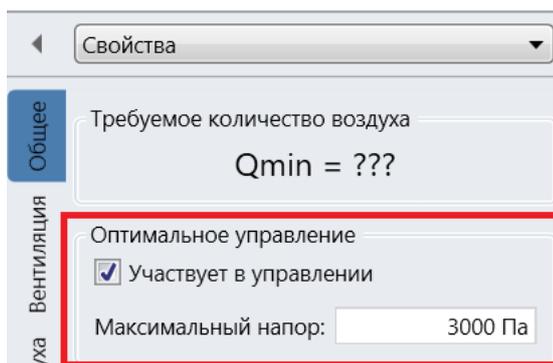
Одним из способов управления воздушораспределением в руднике является установка перемычек с вентиляционными окнами. В этом случае каждая такая перемычка в зависимости от площади её вентиляционного окна пропускает через себя только какую-то долю воздушного потока, а оставшуюся долю направляет в другие области рудника. Однако если перемычек с вентокном становится хотя бы больше двух, то настройка площади соответствующих окон становится весьма затруднительной, так как изменение площади одного вентокна приводит к неочевидному перераспределению воздуха во всем руднике. Кроме того, задача осложняется тем, что оптимальную конфигурацию перемычек желательно подобрать так, чтобы она обеспечивала необходимым количеством воздуха всех потребителей при минимальном напоре на главной вентиляторной установке.

Алгоритм оптимального управления призван автоматизировать решение вышеописанной задачи. Для этого указывается, какие из перемычек с вентокном будут участвовать в управлении (т.е. менять площадь своего вентиляционного окна). Задание того, какие из перемычек следует настраивать, а какие нет, позволяет уменьшить время работы алгоритма в тех случаях, когда площадь вентокна некоторых перемычек заранее очевидна (например, они заведомо должны быть полностью закрыты или открыты). Там же

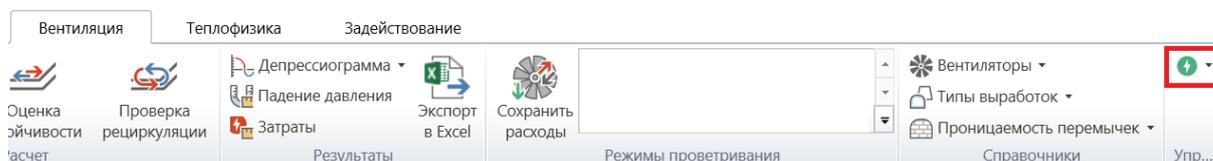
задается требуемый расход воздуха на переключке. При этом такие переключки удобно подсвечивать на схеме (Вид -> Вентиляция -> Оптимальное управление -> Объекты на выработках -> Участие в управлении).



Требуется также отметить, напор каких вентиляторов следует минимизировать, а также указать, чему равен максимальный напор на участвующих в управлении вентиляторах, со значения которого будет начинаться оптимизация.



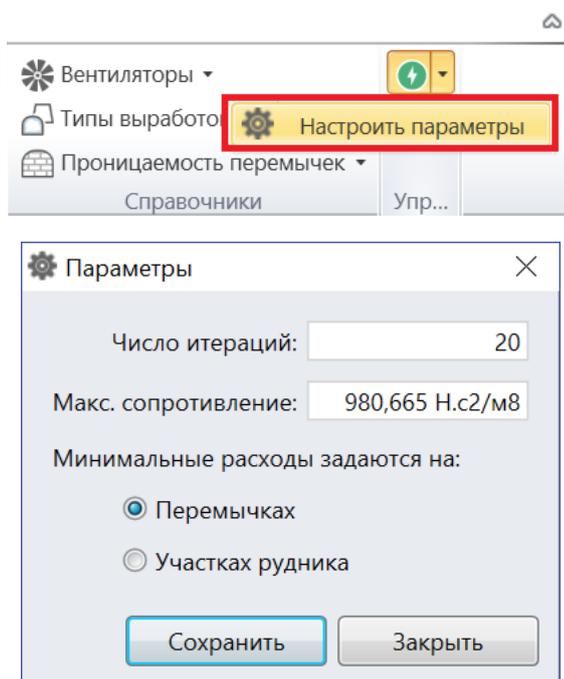
После чего при помощи кнопки *Минимизировать напор вентилятора* на вкладке *Вентиляция* может быть запущен алгоритм оптимального управления.



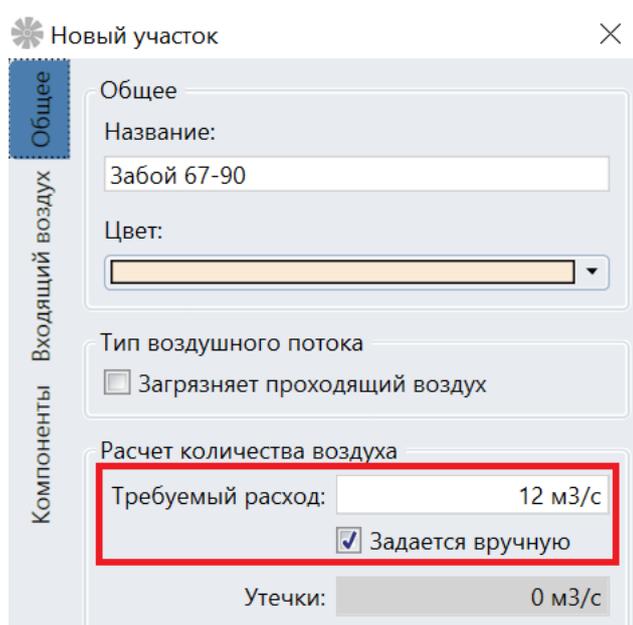
Настройки алгоритма оптимального управления

Алгоритм оптимального управления работает итерационно, подбирая такой напор вентиляторов, при котором путём регулирования площади вентокон в переключках можно добиться удовлетворения всех требований по величине расходов. При этом перебор начинается с максимального значения напоров, которые указывается в свойствах вентиляторов. Когда же окажется, что дальнейшее уменьшение напоров приводит к

невозможности добиться нужных расходов путём регулирования перемычками, тогда напор и конфигурация перемычек на предыдущей итерации считаются оптимальными.

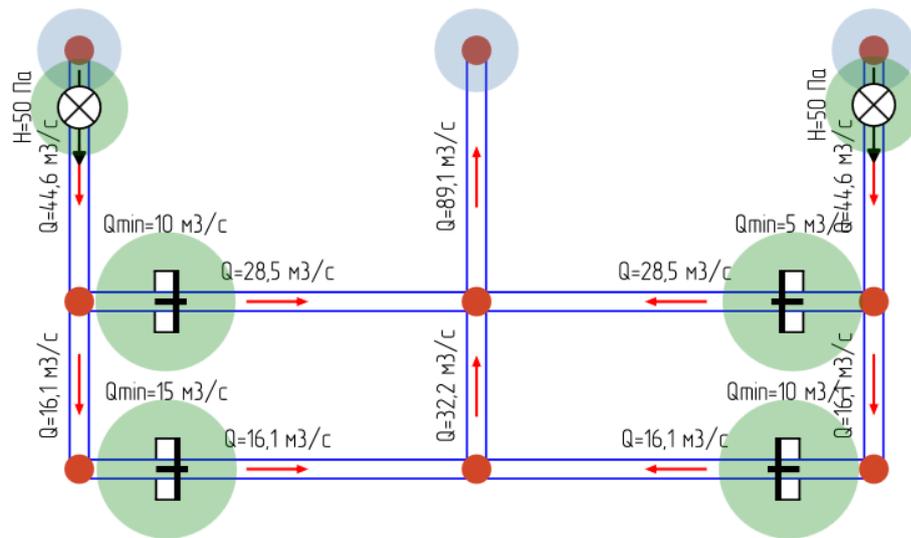


В параметрах алгоритма можно настроить максимальное число итераций при регулировании перемычек, их максимальное допустимое сопротивление, а также способ задания минимальных расходов. В случае опции «Перемычки» минимальные расходы задаются в свойствах каждой перемычки, участвующей в управлении. В случае же опции «Участки рудника», алгоритм оптимального управления пытается обеспечить требуемый входящий расход на всем участке рудника, на котором расположена перемычка. Минимальный расход на участке может быть, как задан вручную, так и вычислен на основе выбранной методики расчета количества воздуха.

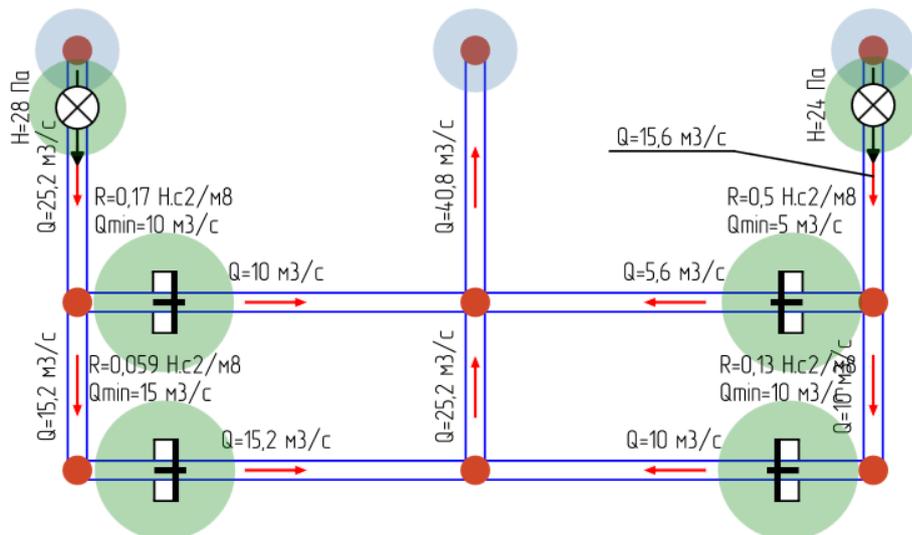


Отображение результатов оптимального управления

Рассмотрим следующий пример сети выработок, в котором оптимальное управление осуществляется при помощи четырех перемычек с веткоком. Минимальные расходы на перемычках отображаются в виде индикаторов (*Вид -> Вентиляция -> Оптимальное управление -> Минимальные расходы на перемычках*). Кроме того, в начале все вентиляционные окна полностью открыты, поэтому все перемычки имеют нулевое аэродинамическое сопротивление. При такой конфигурации перемычек и напоре вентиляторов в 50 Па выработки будут иметь следующие модельные расходы.



Таким образом, расходы в выработках требуется существенно уменьшить. После применения алгоритма оптимального управления картина воздухораспределения изменится.



Расходы в выработках станут равными требуемым значениям, а напоры вентиляторов уменьшатся. Кроме того, на каждой из перемычек будет выбрано оптимальное значение аэродинамического сопротивления.

Обработка данных воздушной съёмки

Необходимость автоматизации

Важным компонентом в модели воздухораспределения в руднике являются аэродинамические сопротивления выработок R . Без знания подобных величин оказывается невозможным предсказать новое воздухораспределение при изменении тех или иных проектных параметров рудника вроде напора главной вентиляторной установки или положения перемычек. Поэтому очень важно периодически измерять значения R выработок в ходе проведения воздушных съёмок. В ходе подобных съёмок выполняется измерение расходов воздуха Q и значений приведённого давления воздуха P (приведённое давление отличается от абсолютного тем, что нивелирует колебания атмосферного давления на поверхности) в определённых точках рудника. В этом случае аэродинамическое сопротивление R вычисляется по следующей формуле.

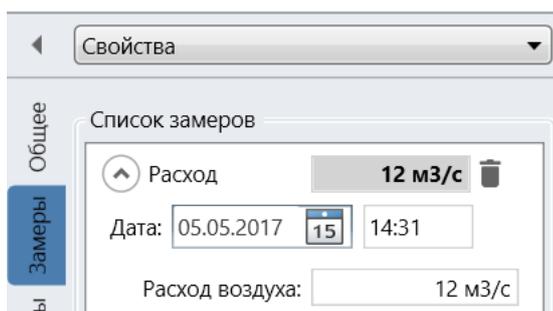
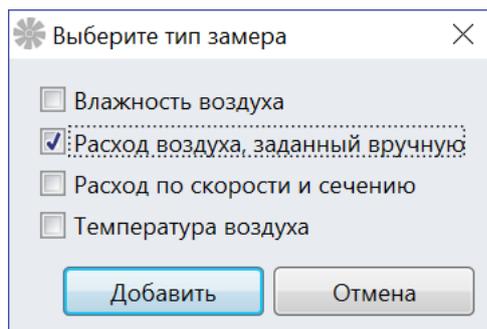
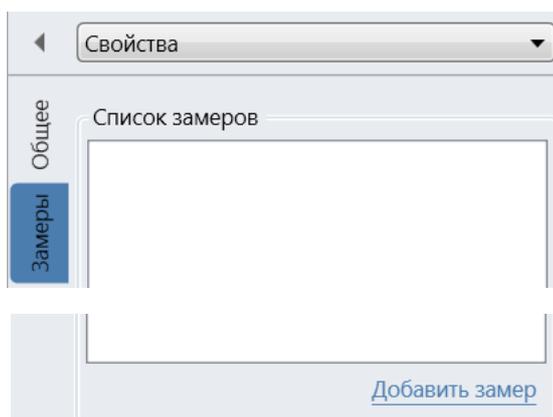
$$R = \frac{\Delta P}{Q^2}$$

ΔP – падение давления в выработке

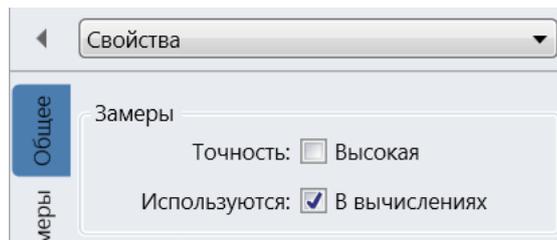
При этом важно отметить, что измерить Q и P во всех сочленениях выработок не представляется возможным, так как общая протяженность горных выработок может достигать нескольких десятков километров. Это неизбежно приводит к тому, что как бы тщательно не проводилась воздушная съёмка, расход Q и приведённое давление P удаётся измерить только для ограниченного числа выработок. Но так как аэродинамические сопротивления R нужно вычислить для всех выработок, то неизмеренные Q и P также необходимо некоторым образом задать. Ранее это обыкновенно делалось путём «разбрасывания» неизвестных расходов и давлений на бумажной схеме рудника таким образом, чтобы новые значения расходов и давлений не противоречили замеренным, а картина воздухораспределения была в целом правдоподобной. Однако при таком подходе качество оценки аэродинамических сопротивлений выработок очень сильно зависело от квалификации и опыта специалиста, задающего неизвестные Q и P . А кроме того, данный процесс отнимал очень много времени. В связи с этим в программе был реализован ряд инструментов, который позволил до некоторой степени автоматизировать обработку данных воздушно-депрессивной съёмки.

Задание замеренных расходов в выработках

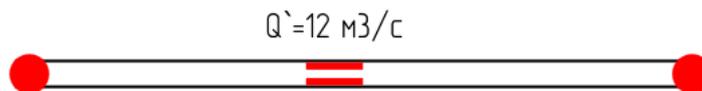
Разумеется, первым шагом к вычислению неизвестных расходов в выработках является задание известных расходов. Делается это не в свойствах самих выработок, а при помощи установки специальных объектов на выработках, называющихся замерные станции. Это позволяет визуально оценивать, в каких местах заданы известные расходы, а в каких нет. Известные расходы же при этом задаются в свойствах замерных станций.



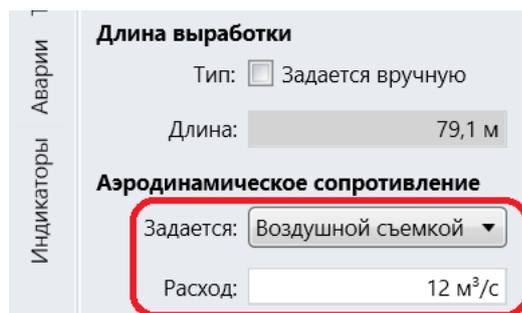
После чего известные расходы легко визуализировать, включив отображение соответствующего индикатора (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Объекты на выработках (индикаторы) -> Расходы воздуха на замерных станциях*). При этом использоваться будут только те замеры, которые помечены галочкой *Используется в вычислениях*.



Это позволяет нанести на схему все выполненные замеры, однако использовать для расчётов только часть из них, оставив другую часть для проверки получившихся результатов.

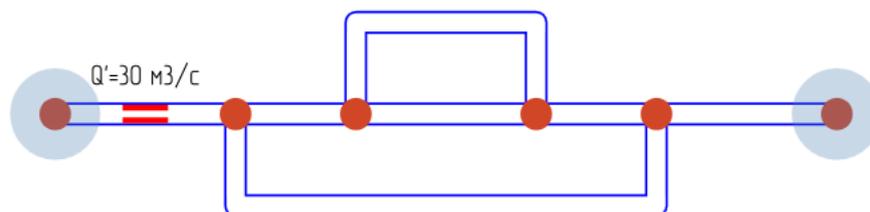


Если же распределение расходов выполняется вручную, то фактические расходы можно задавать непосредственно в свойствах каждой выработки. Для этого следует предварительно выбрать тип расчёта аэродинамического сопротивления равным «*Задаётся воздушной съёмкой*».

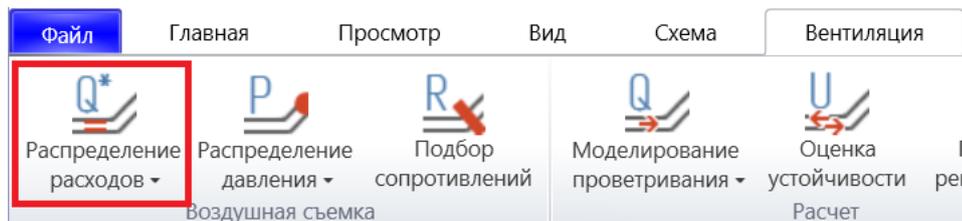


Распределение фактических расходов воздуха по выработкам

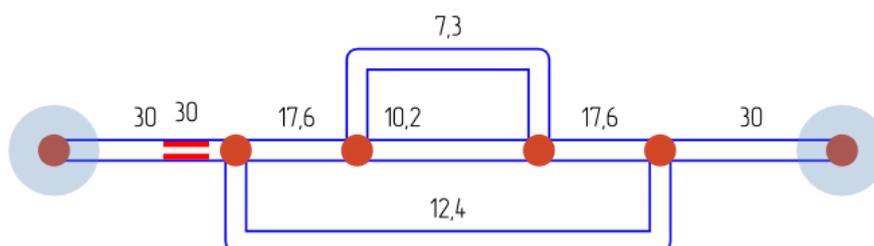
Для корректной работы алгоритма распределения расходов очень важно, чтобы были помечены все узлы, связанные с атмосферой. В этом случае будет считаться, что через такие узлы в сеть выработок может поступать любое необходимое количество воздуха. Рассмотрим работу алгоритма на примере следующей сети.



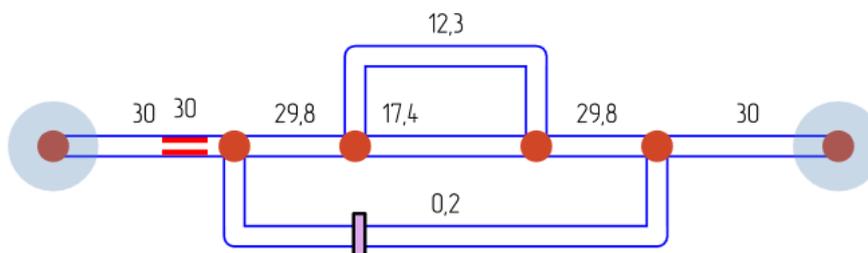
В этой схеме указан известный входящий расход воздуха, а также связь конечных узлов с атмосферой. Запустить алгоритм распределения расходов можно при помощи соответствующей кнопки на вкладке Вентиляция.



В результате расходы распределятся следующим образом (Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Выработки (индикаторы) -> Фактические расходы в выработках).

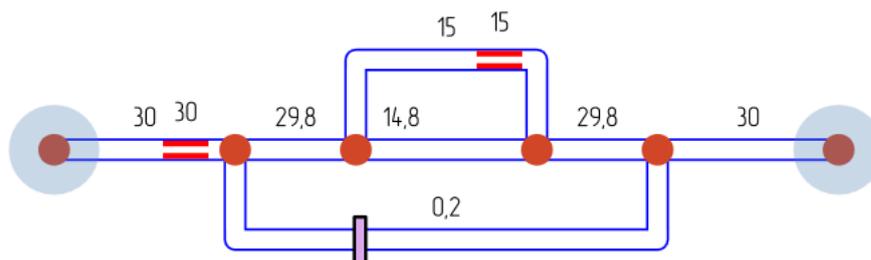


В выработке, по которой воздух поступает в рудник, фактический расход воздуха будет задан в точности равным расходу на замерной станции, а во всех остальных выработках расход будет вычислен, исходя из соотношения их оценочных аэродинамических сопротивлений. Оценочное сопротивление выработки рассчитывается главным образом на основе её длины и площади поперечного сечения, а также сопротивления установленных в ней вентиляционных сооружений. К примеру, можно указать, что в нижней выработке установлена глухая перемычка, которая будет препятствовать движению воздуха. В этом случае алгоритм даст совершенно другую картину воздухораспределения.

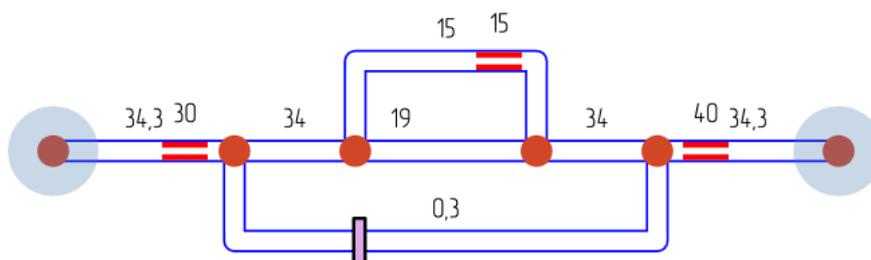


Кроме того, в случае неверной оценки сопротивлений выработок алгоритм следует поправлять, задавая дополнительные известные расходы в соответствующих местах на схеме. Например, в ходе проведения воздушной съёмки могло стать известно, что в самой верхней выработке расход воздуха должен быть равен 15 м куб. в с, а при текущем

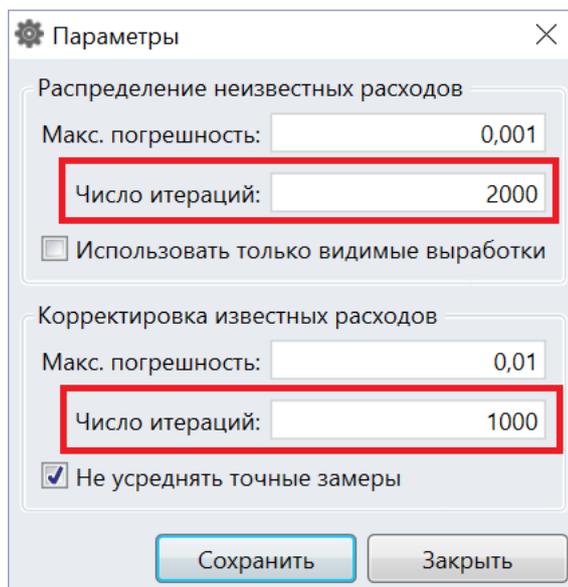
воздухораспределении он составляет только 12.3 м куб. в с. Тогда расход в верхней выработке можно задать в явном виде, установив там замерную станцию.



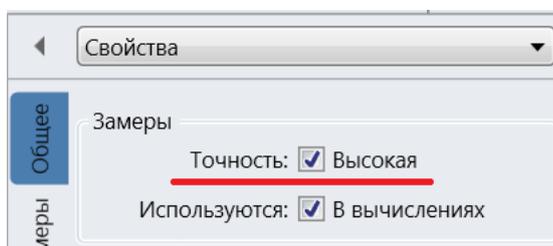
Однако очень часто бывает так, что расходам, измеренным в ходе проведения воздушной съёмки, можно доверять по разным причинам лишь до некоторой степени. В этом случае имеет смысл задавать на схеме избыточное для определения воздухораспределения число известных расходов, предоставляя алгоритму самому корректировать их между собой. Делается это путём увязки балансов входящих и исходящих расходов у всех подсетей выработок, ограниченных со всех сторон замерными станциями. К примеру, в вышеприведенной сети можно дополнительно указать, что расход воздуха на исходящей струе составляет 40 куб. м в с, что будет противоречить данным замерной станции на входящей струе. Однако алгоритм сможет увязать все противоречия, выбрав среднее значение расхода на входящей и исходящей струе, равное 35 куб м в с.



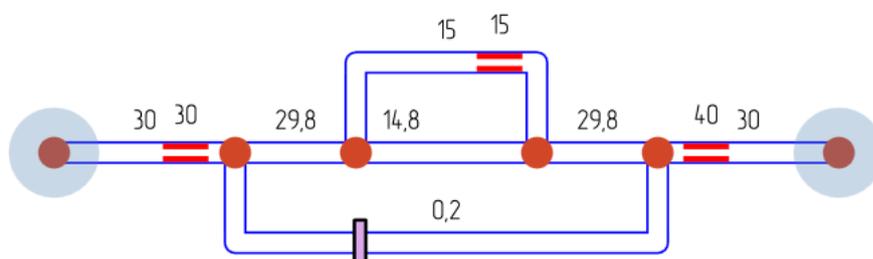
Важно также помнить, что алгоритм распределения расходов работает итерационным способом, поэтому в случае обнаружения неточностей в его работе, следует увеличить число производимых итераций как на этапе распределения неизвестных расходов, так и на этапе корректировки известных расходов.



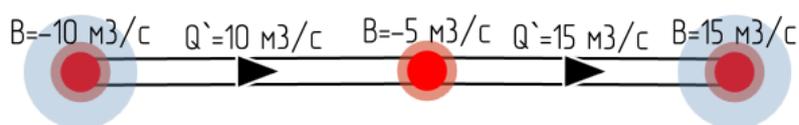
Иногда, однако, некоторые расходы измеряются особенно точно в отличие от остальных. Это бывает актуально, когда одни замеры дают значительные расходы воздуха, которым можно доверять в большей степени, а другие – производятся в тех местах рудника, где воздух движется очень медленно, что означает, что подобным замерам можно доверять в меньшей степени. В этом случае можно указать, что некоторые замеры не должны участвовать в корректировке расходов. Для этого следует установить необходимую опцию на форме с параметрами алгоритма распределения расходов, а также задать соответствующее поле в свойствах замерной станции.



Так, на предыдущей схеме можно указать, что замер, сделанный на входящей струе, имеет высокую точность. В этом случае он не будет подвергаться корректировке.



Алгоритм распределения расходов является полуавтоматическим алгоритмом, который лишь облегчает работу специалиста, но никак не заменяет его. Это означает, что полученные в результате расчёта расходы являются лишь оценкой, которую специалист в области вентиляции может либо принять в качестве приемлемой, либо предоставить алгоритму какие-то дополнительные сведения в виде новых замеров воздуха или же расстановки вентиляционных сооружений в выработках. При этом алгоритм гарантирует, что полученный результат будет наилучшим из тех, которые можно было получить на основании предоставленных данных, а также обеспечивает выполнение наиболее простых соотношений вроде уравнивания балансов входящих и исходящих потоков в узлах выработок. Однако на случай выполнения распределения неизвестных расходов вручную предусмотрен механизм подсветки узлов, в которых соответствующий баланс отличен от нуля (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Конечные вершины -> Балансы для / закона Кирхгофа*).



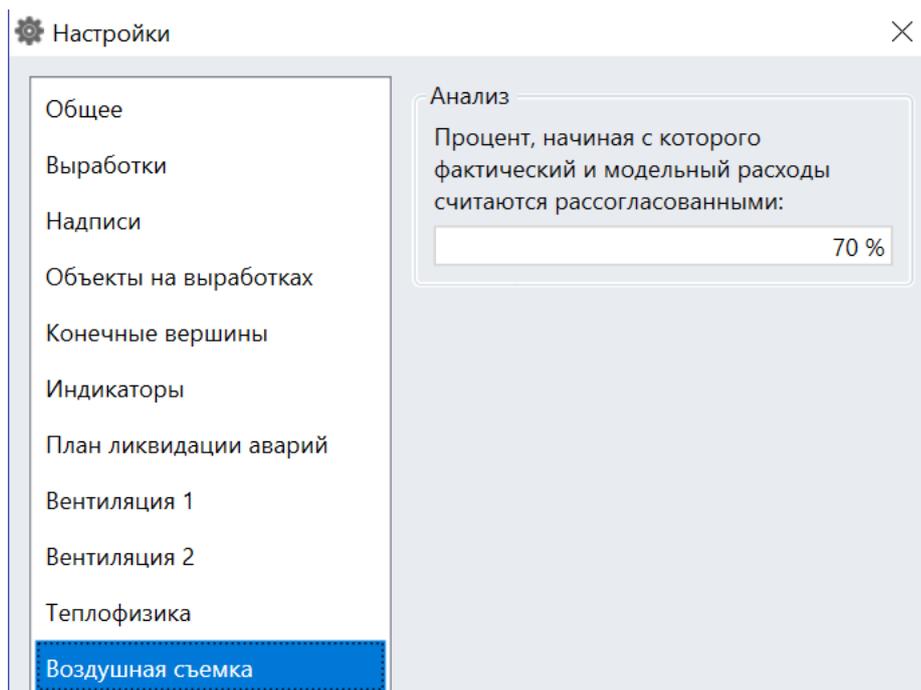
При этом узлы с ненулевым балансом подсвечиваются красной аурой, а сверху отображается соответствующая невязка. Проверяются в том числе и узлы, связанные с атмосферой. В последнем случае отслеживается то, чтобы количество воздуха, взятого из атмосферы, равнялось количеству воздуха, поступившему обратно.

Кроме того, предусмотрен особый режим подсветки тех замерных станций, расходы на которых не соответствуют расходам в выработках более, чем на 10 процентов (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Объекты на выработках -> Замерные станции с неверными расходами*). Это помогает отслеживать те станции, известные расходы в которых в ходе увязки пришлось существенно изменить.

Что же касается остальных проверок, то в данном случае применимы все режимы подсветки, относящиеся к стационарному расчёту воздухораспределения, потому что алгоритм распределения расходов задаёт не только расходы по данным воздушной съёмки, но и модельные расходы. Особенно важно в этом случае проверять наличие рециркуляционных контуров.

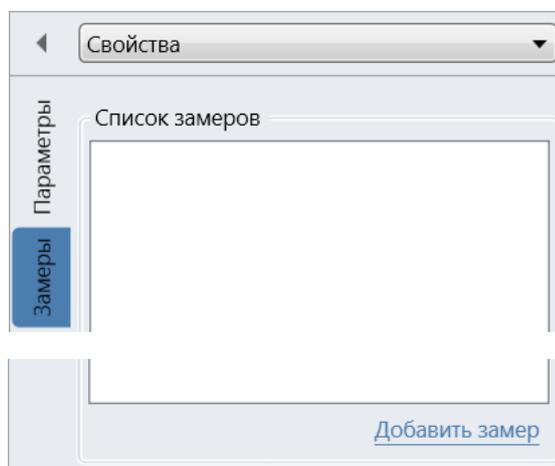
Ещё одной проверкой правильности обработки данных воздушной съёмки может стать построение модели стационарного воздухораспределения на той же самой сети (когда будет завершено распределение давлений и станут известны аэродинамические

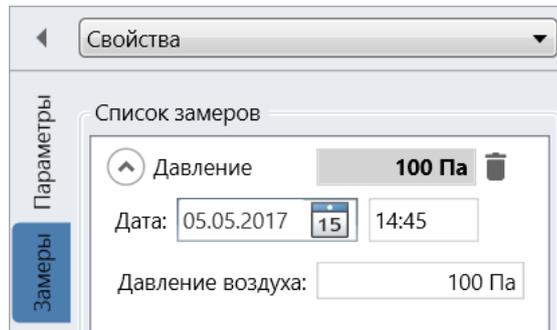
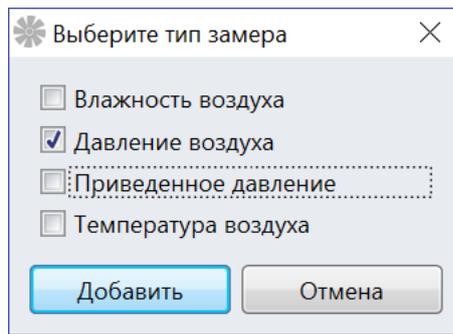
сопротивления всех выработок) после добавления в неё вентиляторов с проектными параметрами. В этом случае можно проверить, что направления всех расходов, определённых по данным замеров, совпадают с направлениями расходом по данным стационарного воздухораспределения. Для упрощения подобной проверки предусмотрен специальный режим подсветки *Вид -> Вентиляция -> Модельные данные -> Выработки -> Рассогласование модельных расходов*. При этом на форме Настроек можно задать процент, начиная с которого модельный и фактический расходы будут считаться рассогласованными.



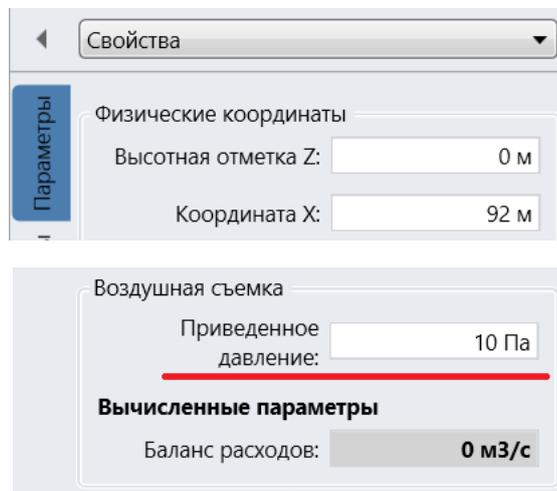
Задание замеренного давления воздуха в узлах выработок

В отличие от фактических расходов данные о замеренном давлении воздуха задаются в свойствах узлов выработок.





В списке замеров указываются данные, полученные в результате проведения воздушно-депрессионной съёмки, если таковые имеются, а в поле *Приведённое давление* – давление, которое будет использоваться для расчёта аэродинамического сопротивления выработок.

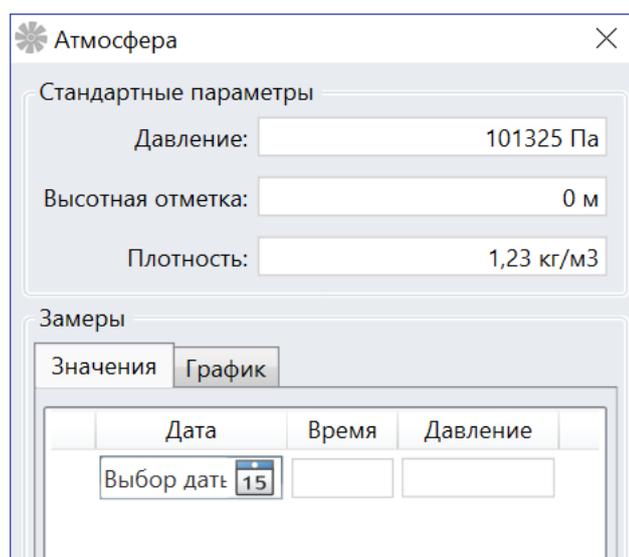
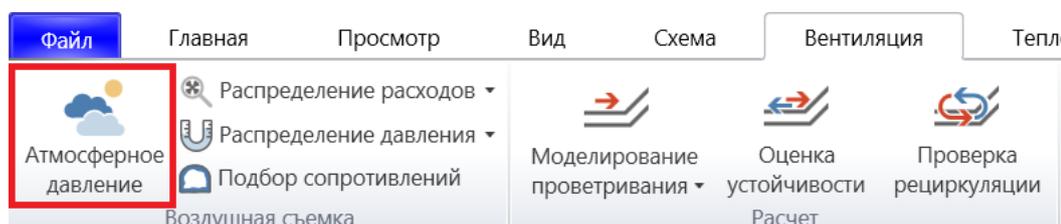


Для отображения обоих значений предусмотрены соответствующие индикаторы (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Конечные вершины (индикаторы) -> Фактическое давление / Приведённое давление*). Кроме того, есть возможность просматривать не сами абсолютные значения давления в узлах, а образовавшиеся перепады давления в выработках (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Выработки (индикаторы) -> Перепады давления*).

Вычисление приведенного давления

На практике замер абсолютного давления воздуха в шахте требуется предварительно откорректировать, прежде чем его можно будет использовать для моделирования. К примеру, следует учесть колебания атмосферного давления, высотную отметку, температуру и влажность воздуха. Если же этого не сделать, то замеренные в разные моменты времени и в разных местах значения давления невозможно будет соотносить друг с другом.

Колебания атмосферного давления можно задать при помощи команды *Атмосферное давление* на вкладке *Вентиляция*.



	Дата	Время	Давление
Выбор даты	15		

В появившейся форме можно указать, какое абсолютное давление нужно считать нормальным атмосферным, а также какая высотная отметка и плотность ему соответствуют. Далее следует заполнить список замеров колебаний атмосферного давления с указанием даты и времени выполнения измерений. Подобный список можно загрузить из стороннего файла в формате CSV при помощи команды *Импорт*. В специальной форме можно настроить параметры импорта.

Импорт из CSV

Общее

Заменить существующие замеры

Разделитель значений: ;

Атмосферное давление

Номер столбца: 3

Единица измерения: Па

Дата и время

Отдельный столбец с датами

Столбец с временем: 2

Даты указаны в явном виде

Дата по умолчанию: 05.05.2017 15

Импорт Отмена

Когда колебания атмосферного давления заданы, фактическое давление в узлах выработок можно вычислять, а не просто задавать вручную. Для этого следует выбирать тип замера «Приведенное давление», вместо «Давление воздуха».

Выберите тип замера

Влажность воздуха

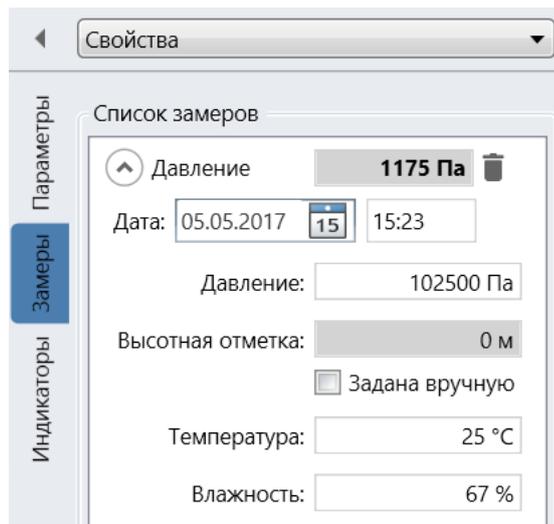
Давление воздуха

Приведенное давление

Температура воздуха

Добавить Отмена

В этом случае помимо значения замеренного давления пользователь может указать высотную отметку, температуру и влажность воздуха.



В итоге замеренное давление будет откорректировано по следующей формуле.

$$P_{corrected} = (P_m - P_a(t)) + \frac{\rho_a + \rho}{2} \cdot (H - H_a)$$

$P_{corrected}$ – откорректированное (приведенное) замеренное давление

P_m – значение давления, замеренное по приборам

$P_a(t)$ – атмосферное давление, в момент времени t , вычисляется по замерам колебаний атмосферного давления

ρ_a – плотность воздуха при атмосферном давлении, заданная пользователем

ρ – плотность воздуха в месте замера давления (вычисляется)

H_a – высотная отметка, соответствующая атмосферному давлению

H – высотная отметка в месте замера давления воздуха, указанная в свойствах замера

Плотность воздуха ρ в месте выполнения замера вычисляется по следующей формуле.

$$\rho = \frac{0.0035 \cdot (P_m - P_a(t) + P_s) \cdot g - 0.00132 \cdot \frac{RH(479 + (11.52 + 1.62 \cdot T)^2)}{100}}{273.15 + T}$$

P_s – стандартное атмосферное давление, заданное пользователем

g – ускорение свободного падения

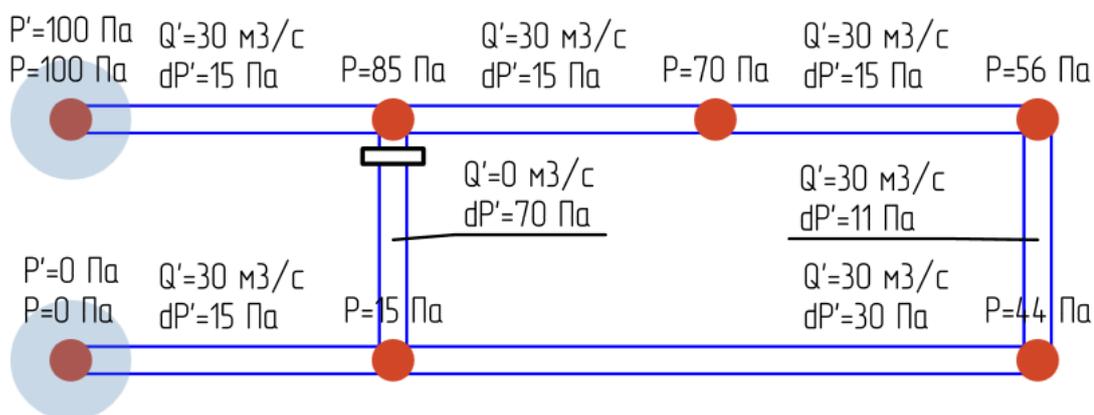
RH – относительная влажность воздуха в месте выполнения замера

T – температура воздуха в месте выполнения замера

Распределение давления воздуха по всем узлам выработок

Так же, как и в случае замеренных расходов, данные о фактическом давлении чаще всего можно получить только для очень ограниченного числа узлов сети. Приведённое давление

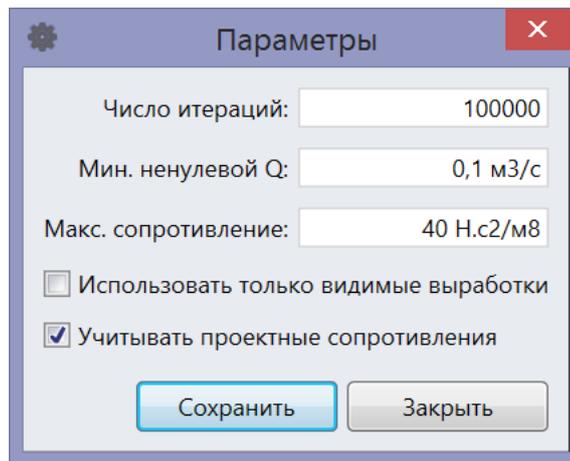
же во всех остальных узлах приходится задавать вручную таким образом, чтобы в целом получалась непротиворечивая картина. В свою очередь, алгоритм распределения давлений призван автоматизировать данный процесс, беря на себя большую часть работы по подбору неизвестных давлений воздуха в узлах выработок. Рассмотрим следующий пример сети.



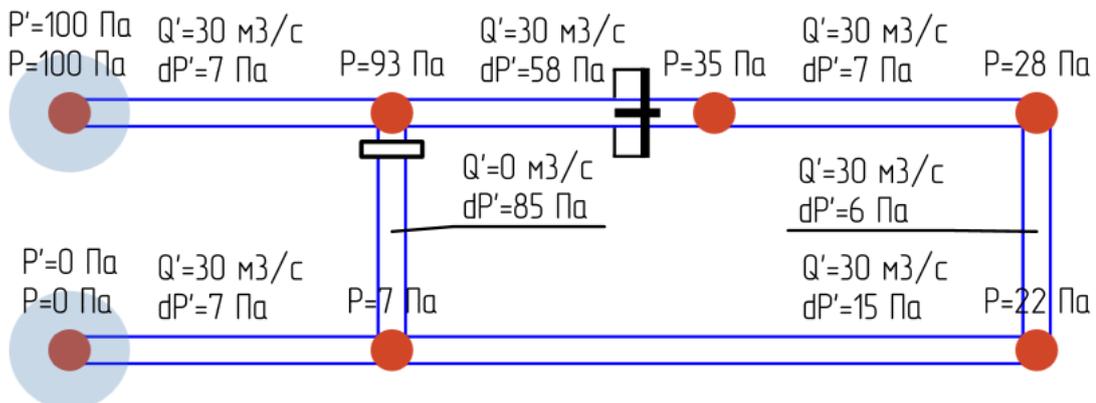
Обязательным условием правильной работы алгоритма распределения давлений является задание фактических расходов во всех выработках. Сделать это можно либо вручную, либо воспользовавшись автоматизированным алгоритмом распределения расходов. В данной сети расход сначала был задан на единственной замерной станции, а все остальные расходы в выработках были вычислены на его основе. Затем в каждом из узлов, связанных с атмосферой, было задано фактическое давление воздуха, равное 100 и 0 Паскалей соответственно. А потом был запущен алгоритм распределения давлений (кнопка *Распределение давления* на вкладке *Вентиляция*).



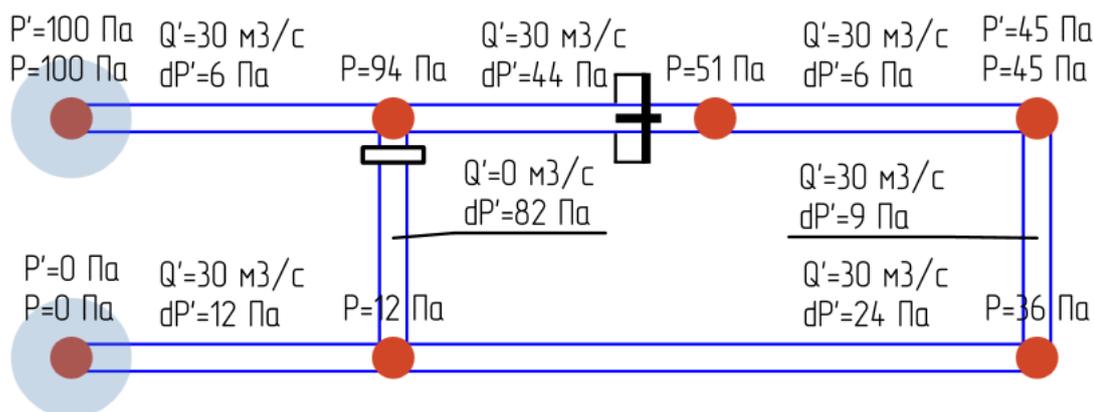
В результате во всех узлах было задано приведённое давление (индикатор P). В атмосферных узлах оно, разумеется, стало равным указанному в них фактическому давлению, а во всех же остальных – некоторому оценочному значению давления, которое не приводит к неправдоподобной картине воздухораспределения. При этом по умолчанию алгоритм распределил перепады давления в соответствии с соотношением аэродинамических сопротивлений выработок. Хотя в настройках алгоритма это можно отключить и указать, что при распределении давлении нужно считать сопротивления всех выработок одинаковыми.



То есть если в вышеприведённой схеме установить переключку с регулируемым окном в одной из выработок, то при включённой опции *Учитывать проектные сопротивления* алгоритм распределит давления в узлах так, что наибольший перепад давления придётся как на раз на эту переключку.



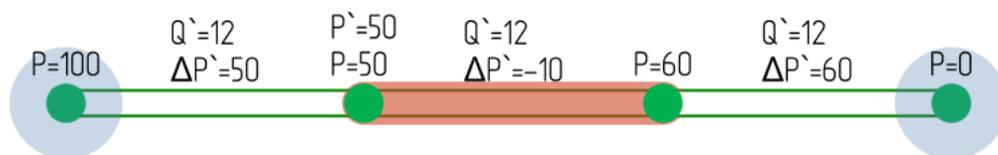
Так, после установки переключки в соответствующей выработке перепад давления увеличился с 15 до 58 Паскалей. При этом картину распределения давлений всегда можно итерационно поправлять, расставляя новые замеры фактического давления на схеме. К примеру, в ходе воздушно-депресссионной съёмки могло стать известно, что давление в верхнем правом узле составляет не 28 Паскалей, как это оценил алгоритм, а 45 Паскалей. В этом случае достаточно установить новый замер в этом узле, что приведёт к изменению всей картины распределения давления.



Кроме того, важно ограничивать максимальное возможное проектное сопротивление выработки (параметр «Макс. сопротивление» на форме с настройками), чтобы общий перепад давления не сосредотачивался на какой-то одной глухой перемычке с очень большим проектным сопротивлением. Помимо этого, необходимо указывать минимальный расход воздуха («Минимальный ненулевой Q»), начиная с которого выработка не будет участвовать в алгоритме распределения давления. Это позволит задать правдоподобные значения приведённого давления в тех местах, где воздух почти совсем не течёт.

Проверка корректности распределения давления

Распределение давления на схеме может производиться как вручную, так и при помощи соответствующего автоматического алгоритма. И в том, и в другом случае полезно проверять полученный результат при помощи специального режима подсветки выработок с неправильно заданным перепадом давления (*Вид -> Вентиляция -> Исходные данные -> Выработки -> Неверные перепады давления*). Перепад давления в выработке считается неправильным в том случае, когда падение давления направлено против направления движения воздуха в выработке. Рассмотрим следующий пример.



В этой сети во всех трёх выработках указан фактический расход, равный 12 куб м в с. Однако падение давления совпадает с направлением расхода только в первой и третьей выработке. Средняя же выработка подсвечивается красной аурой, так как движение воздуха в ней сопровождается повышением давления.

Подбор проектных сопротивлений на основе фактических

Когда во всех выработках указаны расходы, а во всех узлах задано давление согласно данным воздушно-депресссионной съёмки, то в этот момент становится возможным вычислить аэродинамические сопротивления выработок. Для этого на панели свойств выработки достаточно указать, что аэродинамическое сопротивление рассчитывается по данным воздушной съёмки. После чего станет доступным для редактирования уже заполненное поле фактического расхода воздуха в выработке, а также по умолчанию будет указано, что перепад давления в выработке будет вычисляться по разности приведённых давлений в конечных узлах.

 Задается вручную' (Pressure drop: Set manually), and a pressure drop input field with '50 Па'."/>

Аэродинамическое сопротивление

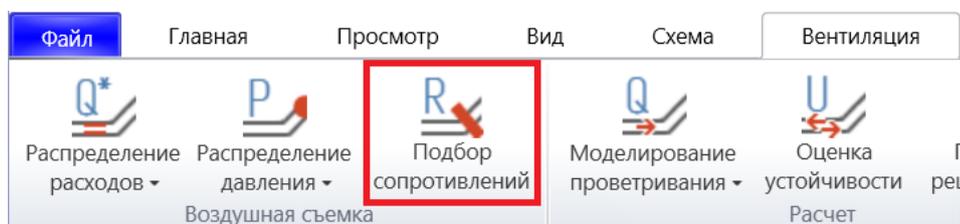
Задается: Воздушной съёмкой

Расход:

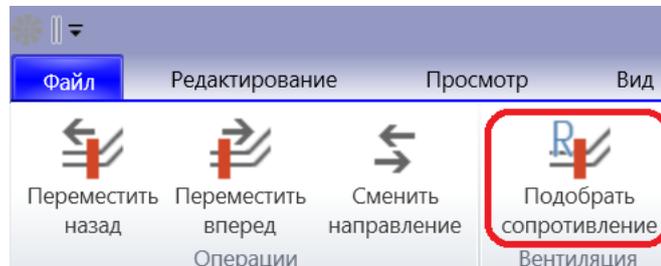
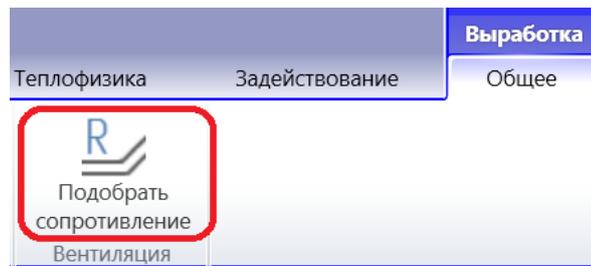
Падение P: Задается вручную

ΔP :

Однако такой способ расчёта сопротивлений выработок не является удобным. Дело в том, что в этом случае в аэродинамическое сопротивление выработки включается и аэродинамическое сопротивление всех её вентиляционных сооружений. Расчёт же вентиляции на руднике подразумевает прогнозирование воздухораспределения в случае изменения разного рода проектных параметров, что весьма затруднительно, когда аэродинамическое сопротивление самой выработки и всех установленных в ней перемычек задаётся одной и той же величиной. Чтобы этого избежать, в программе предусмотрен специальный алгоритм подбора проектных параметров выработок (через коэффициент шероховатости стенок) и перемычек (площадь вентиляционного окна / воздухопроницаемость) так, чтобы получить на выходе нужные суммарные аэродинамические сопротивления выработок и их вентсооружений, но только заданные по проектным данным.



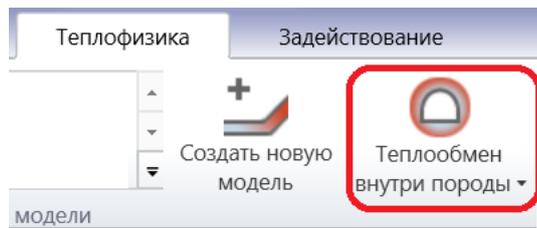
Соответствующая кнопка на вкладке *Вентиляция* делает это для всех выработок на схеме. Однако данная операция может также производиться только для отдельных выделенных выработок или перемычек.



Последнее особенно удобно, потому что задание сопротивления выработки по проектным данным важно только в тех местах, где будет происходить регулирование, поэтому подбирать проектное сопротивление у всех выработок обычно не имеет смысла.

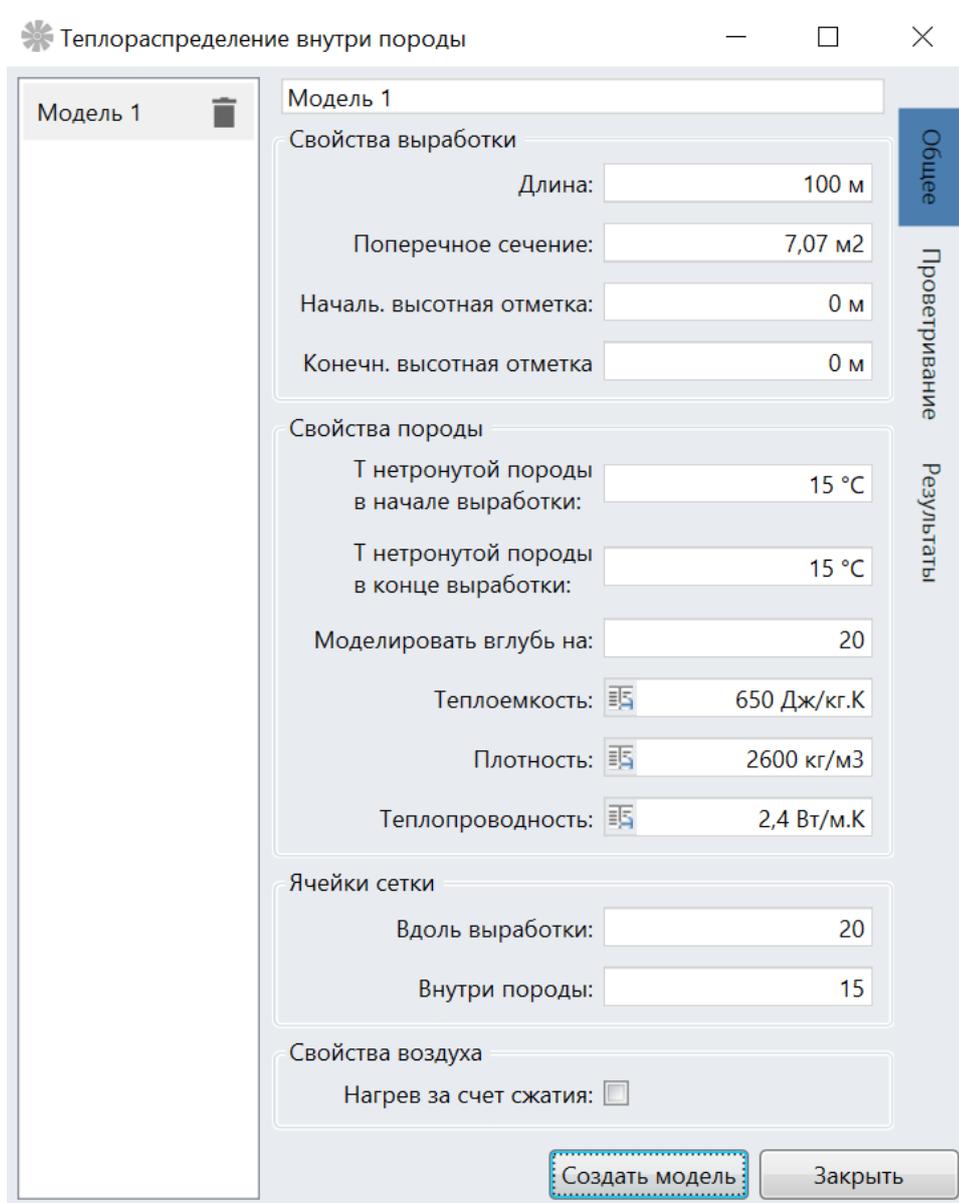
Проектирование вентиляции предполагает не только обеспечение нужным количеством воздуха потребителей внутри рудника, но и соблюдение при этом всех необходимых норм безопасности. Одной из таких норм часто является требование того, чтобы температура воздуха в выработках лежала в пределах от 2 до 27 градусов Цельсия. Недопущение проникновения слишком холодного воздуха в шахту связано с требованием предотвращения образования наледи, которая может быть весьма опасна, когда речь идёт, например, о вентиляционных стволах. Что касается ограничения максимальной температуры воздуха, то оно связано с необходимостью поддержания комфортного для работы людей микроклимата. Однако проектирование вентиляции с учётом ограничений, накладываемых на температуру воздуха, наталкивается на весьма серьёзное затруднение. Помимо всех остальных факторов влияние на температуру воздуха оказывает теплообмен с окружающей выработки породой. Сложность здесь заключается в том, что весьма затруднительным представляется сказать что-то конкретное о том теплораспределении, которое сложилось внутри породы на текущий момент времени. В такой ситуации используют два основных метода. Первый метод применим, если можно провести температурную съёмку на месте и выяснить, какой перепад температуры происходит в выработке при текущем расходе воздуха. В этом случае можно вычислить так называемый коэффициент нестационарного теплообмена, который позволит с разумной точностью спрогнозировать перепад температуры в той же выработке при другом расходе. Недостатком данного подхода является то, что он требует проведения замеров, а также то, что при этом совершенно не учитывается охлаждение или нагревание окружающей выработку породы. Второй же метод предполагает моделирование теплообмена воздуха с породой во времени. В этом случае становится возможным оценить текущее теплораспределение в породе, просто начав моделирование с момента прокладки выработки, и, кроме того, появляется возможность построить прогноз температуры воздуха с учётом динамики изменения температуры в породе.

Для моделирования теплообмена породы с воздухом в выработке в соответствии со вторым подходом в программе предусмотрен особый редактор, который открывается при помощи специальной кнопки на вкладке *Теплофизика*.



В этом редакторе предоставляется возможность моделировать нестационарный теплообмен с породой только для одной выработки, однако позже будет описано, как можно решать задачу нестационарного теплообмена в сетевой поставке.

В самом начале необходимо создать новую модель теплораспределения, нажав соответствующую кнопку, а затем указать имя у новой модели.



Прежде всего необходимо пояснить, что моделирование теплообмена происходит не с бесконечным объёмом породы, а только с тем объёмом, который ограничен воображаемым цилиндром с вертикальной осью, совпадающей с осью выработки. Радиус

такого цилиндра называется радиусом тепловыравнивающей рубашки и должен выбираться таким образом, чтобы гарантировать, что на выбранном расстоянии от выработки температура породы испытывает пренебрежимо малые колебания вследствие теплообмена с воздухом в выработке.

Свойства породы

Т нетронутой породы в начале выработки:	<input type="text" value="15"/>	°C
Т нетронутой породы в конце выработки:	<input type="text" value="15"/>	°C
Моделировать вглубь на:	<input type="text" value="20"/>	м

Затем выбранный цилиндрический объем делится на малые цилиндры вдоль направления выработки по указанному числу продольных участков.

Ячейки сетки

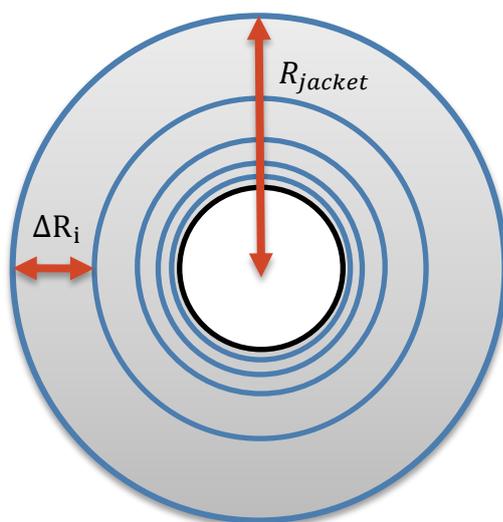
Вдоль выработки:	<input type="text" value="20"/>
Внутри породы:	<input type="text" value="15"/>

А потом порода внутри каждого такого продольного цилиндра делится на концентрические кольца толщиной ΔR_i по указанному числу радиальных участков.

Ячейки сетки

Вдоль выработки:	<input type="text" value="20"/>
Внутри породы:	<input type="text" value="15"/>

Причём толщина концентрических колец выбирается таким образом, чтобы около стенок выработки оказалось кольцо толщиной в 0.6 мм, а далее толщина колец увеличивалась в одинаковое число раз, давая в сумме радиус тепловыравнивающей рубашки R_{jacket} за вычетом радиуса выработки. Такое деление позволяет при минимальном числе колец добиться того, чтобы модель адекватно учитывала градиент температуры породы в тонком слое породы, непосредственно соприкасающемся с воздухом в выработке.



Кроме того, предполагается, что теплообмен в породе происходит только в радиальном направлении, а в горизонтальном направлении теплота переносится только за счёт движения воздуха в выработке. С учётом всех этих предположений для каждого концентрического кольца с радиальным индексом i (при нумерации от стенок выработки) можно записать следующее уравнение, которое будет увязывать тепловой поток от соседних колец с изменением температуры в текущем кольце.

$$k_{conductivity} \cdot \Delta t \cdot \left(S_i \cdot \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\frac{\Delta R_{i-1} + \Delta R_i}{2}} + S_{i+1} \cdot \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\frac{\Delta R_{i+1} + \Delta R_i}{2}} \right) = -c_{rock} \cdot \rho_{rock} \cdot V_i \cdot T_i^{n-1}$$

$k_{conductivity}$ – теплопроводность породы

Δt – время, за которое воздух в выработке успеваает пройти один продольный участок при текущем расходе воздуха

T_i^n – неизвестная температура породы в i -ом кольце на n -ом шаге моделирования

T_{i-1}^n – неизвестная температура породы в $(i - 1)$ -ом кольце на n -ом шаге моделирования

T_{i+1}^n – неизвестная температура породы в $(i + 1)$ -ом кольце на n -ом шаге моделирования

T_i^{n-1} – известная температура породы в i -ом кольце на $(n - 1)$ -ом шаге моделирования

S_i – площадь поверхности соприкосновения i -го кольца с $(i - 1)$ -ым кольцом

S_{i+1} – площадь поверхности соприкосновения i -го кольца с $(i + 1)$ -ым кольцом

ΔR_i – толщина i -го кольца

c_{rock} – удельная теплоёмкость породы

ρ_{rock} – плотность породы

V_i – объем i -го кольца

Если уравнение записывается для кольца, граничащего с нетронутым массивом породы, то оно записывается в следующем виде.

$$k_{conductivity} \cdot \Delta t \cdot \left(S_i \cdot \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\frac{\Delta R_{i-1} + \Delta R_i}{2}} - S_{outer} \cdot \frac{T_i^n}{\frac{\Delta R_i}{2}} \right) = -c_{rock} \cdot \rho_{rock} \cdot V_i \cdot T_i^{n-1} - k_{conductivity} \cdot \Delta t \cdot S_{outer} \cdot \frac{T_{outer}}{\frac{\Delta R_i}{2}}$$

T_{outer} – температура нетронутой породы

S_{outer} – площадь соприкосновения наружного кольца с окружающей породой

Если же уравнение записывается для кольца, соприкасающегося с воздухом в выработке, то оно имеет следующий вид.

$$k_{conductivity} \cdot \Delta t \cdot \left(S_0 \cdot \frac{-T_i^n}{\frac{\Delta R_i}{2}} + S_{i+1} \cdot \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\frac{\Delta R_{i+1} + \Delta R_i}{2}} \right) = -c_{rock} \cdot \rho_{rock} \cdot V_i \cdot T_i^{n-1} - k_{emission} \cdot T_{air}^{n-1} \cdot S_0 \cdot \Delta t$$

T_{air}^{n-1} – известная температура воздуха на предыдущей итерации на текущем продольном участке

$k_{emission}$ – коэффициент теплоотдачи у стенок выработки

S_0 – площадь соприкосновения воздуха со стенками выработки на текущем продольном участке

Таким образом, зная температуру породы в кольцах и температуру воздуха на предыдущем шаге, вышеприведённую систему уравнения можно решить и найти температуру породы в кольцах на следующем шаге, т.е. через Δt времени. После чего температуру воздуха можно скорректировать следующим образом.

$$T_{air}^n = \frac{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot V_{air} \cdot T_{air}^{n-1} + k_{emission} \cdot S_0 \cdot \Delta t \cdot T_{wall}^n}{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot V_{air} + k_{emission} \cdot S_0 \cdot \Delta t}$$

T_{air}^n – неизвестная температура воздуха на текущем продольном участке на n-ой итерации

T_{air}^{n-1} – известная температура воздуха на текущем продольном участке теплообмена с породой на (n – 1)-ой итерации

ρ_{air} – плотность воздуха

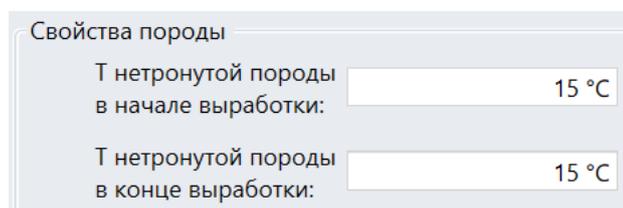
c_{air} – удельная теплоемкость воздуха

V_{air} – объем воздуха на текущем продольном участке

T_{wall}^n – температура ближайшего кольца породы на n-ой итерации

В итоге после пересчёта температуры породы и воздуха на всех продольных участках температуру воздуха на этих участках можно просто сдвинуть на одну позицию в направлении движения воздуха, смоделировав указанный расход, если выбрать Δt таким образом, чтобы воздух успевал за это время пройти ровно длину одного продольного участка.

При этом температура породы в начальный момент модельного времени задаётся на основе температуры, указанной в настройках, где можно задать температуру породы в начале и в конце выработки. Причём начальная температура породы будет интерполирована между указанными значениями вдоль длины выработки и задана равномерно в радиальном направлении на каждом продольном участке, а также будет считаться температурой нетронутой породы для каждого из таких участков.



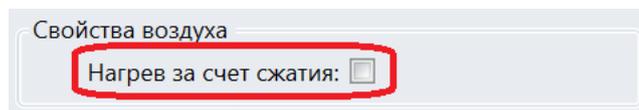
Свойства породы

Т нетронутой породы в начале выработки: 15 °C

Т нетронутой породы в конце выработки: 15 °C

Учёт гидростатического сжатия воздуха

Помимо теплообмена с породой на температуру воздуха внутри выработки может также оказывать влияние нагрев воздуха за счёт его гидростатического сжатия. Это связано с тем, что при движении воздуха по наклонной выработке происходит изменение давления воздуха, что приводит изменению его температуры. Если воздух опускается в глубину рудника, то его температура расчёт, а если поднимается – то падает. Если перепад глубины между начальным и конечным узлом выработки не велик, то этим эффектом можно пренебречь, однако ситуация кардинально меняется при моделировании нестационарного теплообмена в стволах, когда перепад глубины может достигать нескольких сотен метров и более. В таких случаях необходимо включать опцию учёта гидростатического сжатия при расчёте температуры воздуха.



Свойства воздуха

Нагрев за счет сжатия:

Кроме того, в этом случае нужно задать высотную отметку начального и конечного узла у выработки.

Свойства выработки

Длина:

Радиус:

Началь. высотная отметка:

Конечн. высотная отметка:

Тогда температура воздуха T_{air} на каждом продольном участке выработки будет дополнительно корректироваться на величину, вычисляемую по следующей формуле.

$$T_{air} = T_{air} + \frac{g \cdot \Delta H}{n \cdot (c_{air} + R_{air})}$$

g – ускорение свободного падения

ΔH – перепад высоты в выработке

n – число продольных участков в выработке

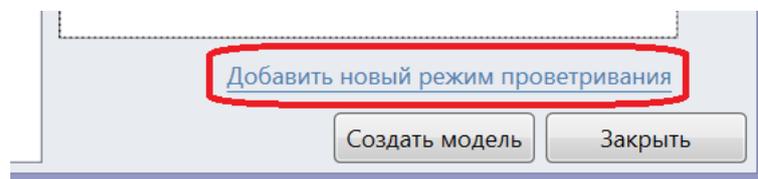
c_{air} – удельная теплоемкость воздуха

R_{air} – газовая постоянная для воздуха

Задание режимов проветривания выработки

После задания теплофизических параметров породы следует заполнить список режимов проветривания выработки, упорядоченный по порядку применения этих режимов. Такой список предусмотрен для того, чтобы иметь возможность моделировать историю проветривания выработки с момента её прокладки внутри нетронутого массива породы. В таком случае станет возможной оценка текущего теплораспределения внутри породы и прогноз его дальнейшей динамики.

По умолчанию у новой модели всегда есть один режим проветривания, однако список режимов можно пополнять при помощи кнопки *Добавить новый режим проветривания*.



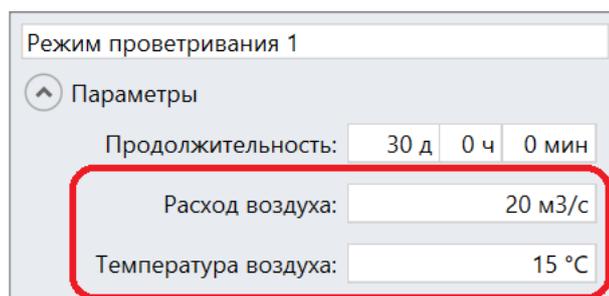
У каждого режима задаётся продолжительность модельного времени, в течение которого он будет применяться.

Режим проветривания 1

↑ Параметры

Продолжительность:

Кроме того, для каждого режима проветривания указывается расход и температура поступающего в выработку воздуха.



Режим проветривания 1

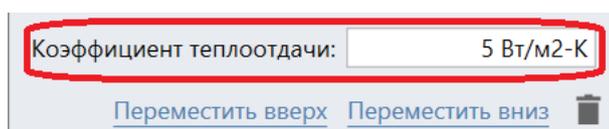
Параметры

Продолжительность: 30 д 0 ч 0 мин

Расход воздуха: 20 м3/с

Температура воздуха: 15 °C

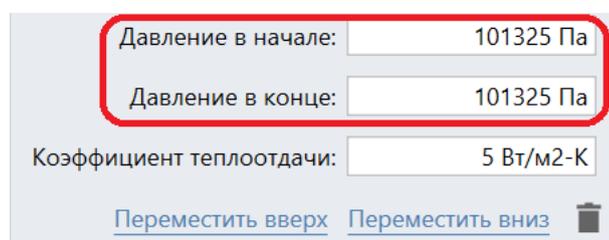
Именно этот расход используется для определения параметра Δt при решении уравнений тепловых балансов для колец породы. Заданная же в режиме проветривания температура воздуха является той температурой, которая указывается для первого продольного участка при смещении температуры воздуха на участках в ходе моделировании движения воздуха. Здесь же задаётся и коэффициент теплоотдачи у стенок выработки, так как его величина может меняться в зависимости от расхода в выработке.



Коэффициент теплоотдачи: 5 Вт/м2-К

[Переместить вверх](#) [Переместить вниз](#) 

Помимо всего прочего, здесь же можно указать установившееся давление воздуха в начале и конце выработки.



Давление в начале: 101325 Па

Давление в конце: 101325 Па

Коэффициент теплоотдачи: 5 Вт/м2-К

[Переместить вверх](#) [Переместить вниз](#) 

Указание данных величин позволит скорректировать участвующую в расчёте величину плотности воздуха ρ в каждом продольном участке выработки, используя следующую формулу.

$$\rho = \frac{P}{R_{air} \cdot (T + 273.15)}$$

P – давление воздуха на текущем участке выработки

R_{air} – газовая постоянная для воздуха

T – температура воздуха на участке выработки

Причём если на выработки выделен всего один участок, то давление P вычисляется следующим образом.

$$P = \frac{P_{from} + P_{to}}{2}$$

P_{from} – давление воздуха в начальном узле выработки

P_{to} – давление воздуха в конечном узле выработки

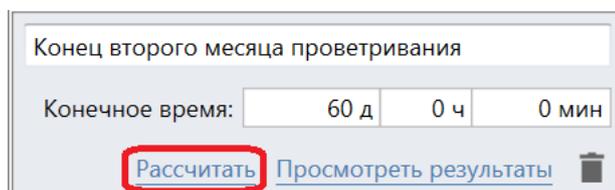
Если же участков много, то используется другая формула.

$$P = \frac{P_{from} \cdot (n - i - 1) + P_{to} \cdot i}{n - 1}$$

i – индекс текущего участка (от 0 до $n-1$)

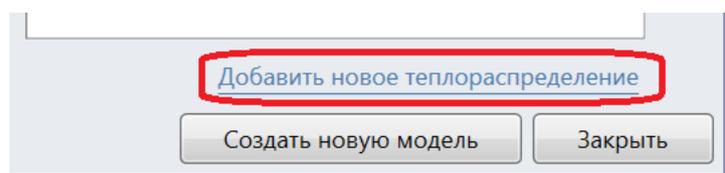
Расчёт нестационарного теплообмена

Чтобы получить картину теплораспределения внутри породы, а также температуру воздуха в выработке на какой-то момент модельного времени, прежде всего нужно создать именованный элемент, называемый «вычислением», который будет хранить все итоговые параметры. По умолчанию новая модель уже имеет один такой элемент с конечным временем один день, однако этот элемент не содержит никаких вычисленных результатов. Начать следует с задания имени вычисления и конечного времени, после чего все будет готово к началу моделирования (кнопка *Рассчитать*).



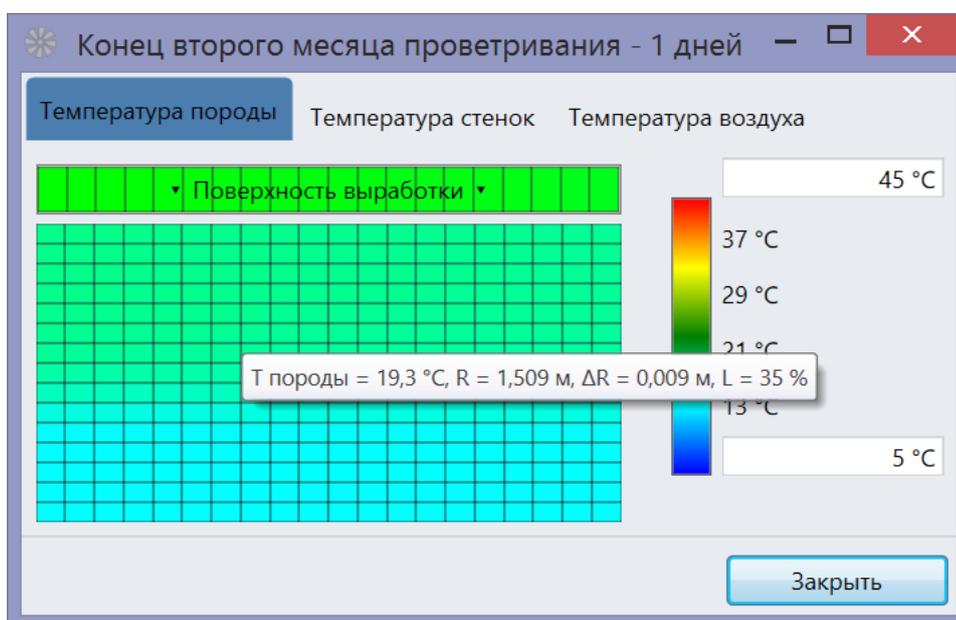
При моделировании будут применяться указанные режимы проветривания в соответствии с их продолжительностями и порядком следования. К примеру, если заданы три режима проветривания продолжительностью один месяц каждый, а конечное время моделирования выставлено равным 60 дней, то будут использованы только первые два режима. Если же конечное время таково, что оно превышает суммарную продолжительность всех указанных режимов проветривания, то последний режим будет применяться всё недостающее модельное время.

Чтобы иметь возможность сравнивать результаты моделирования для различных исходных параметров и конечного времени моделирования, существует возможность сохранять несколько разных вычислений по отдельности. Добавление нового вычисления при этом выполняется при помощи кнопки *Добавить новое теплораспределение*.



Просмотр результатов расчёта

Когда моделирование нестационарного теплообмена завершено, его результаты показываются на специальной форме, которую позже можно повторно открыть при помощи кнопки *Просмотреть результаты* у соответствующего вычисления. На первой вкладке этой формы отображается градиент температуры породы в различных кольцах породы вокруг выработки, а также градиент температуры воздуха в продольных участках (полоска сверху). Размеры сетки с градиентом температуры породы совпадают с размерами, указанными в качестве числа продольных и радиальных участков в модели теплообмена. Цвета градиента можно варьировать, меняя предельные значения у калибровочной полоски справа. При наведении мыши на сегмент с температурой породы появляется всплывающая подсказка, в которой можно просмотреть точную температуру породы ($T_{\text{породы}}$), удаление кольца от центра выработки R , толщину выбранного слоя ΔR , а также местоположение кольца вдоль выработки в процентах L .



Более подробную информацию о температуре воздуха можно получить на одноименной вкладке, где отображается соответствующий график.



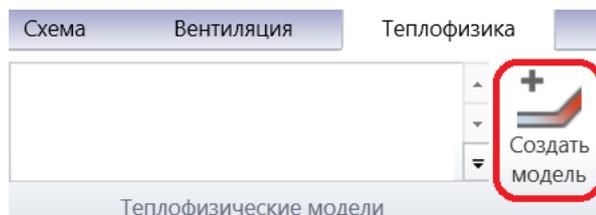
Присутствует также вкладка с графиком изменения температуры стенок выработки.



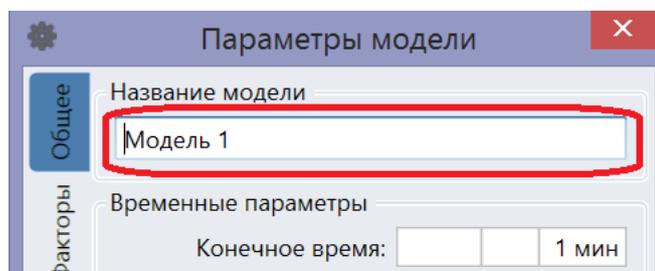
Сетевая теплофизическая модель

Создание новой модели

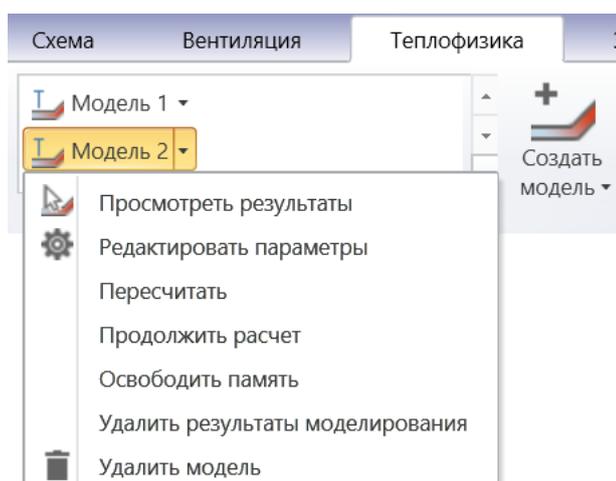
Создание новых сетевых теплофизических моделей происходит при помощи кнопки *Создать модель* на вкладке *Теплофизика*.



Затем открывается окно с параметрами новой модели, в котором, в частности, можно указать название.



Все созданные теплофизические модели отображаются в виде списка на вкладке *Теплофизика*.



Основные принципы моделирования

Теплофизический расчёт представляет собой расширенную модель вентиляции рудника, в которой можно не просто вычислять стационарные модельные расходы, но и прогнозировать их изменение с учётом множества различных факторов, а также следить за такими теплофизическими параметрами воздуха, как концентрация газа, температура и влажность воздуха.

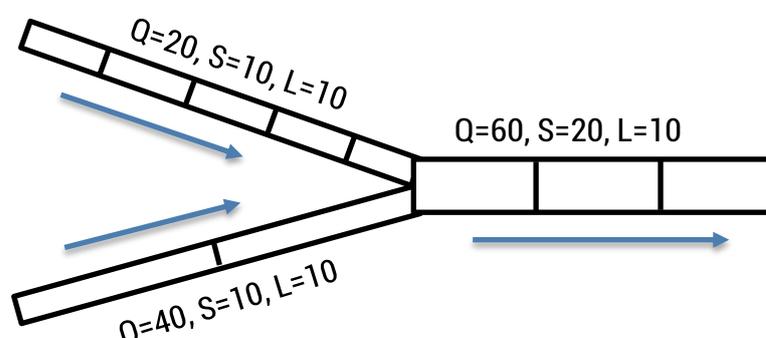
Для этого воздух в выработках разбивается на элементарные объёмы (участки) так, чтобы за выбранный шаг модельного времени воздух в каждой из выработок смещался на длину одного элементарного объёма. Т.е. длина элементарного участка (объёма) L_i вычисляется по следующей формуле.

$$L_i = (\text{integer}) \frac{Q}{S} \cdot L$$

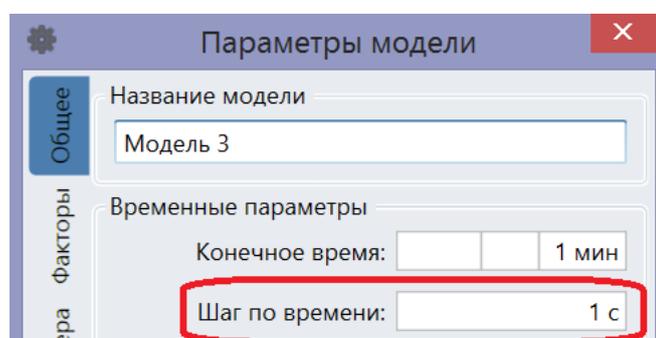
Q – расход воздуха в выработке

S – площадь поперечного сечения выработки

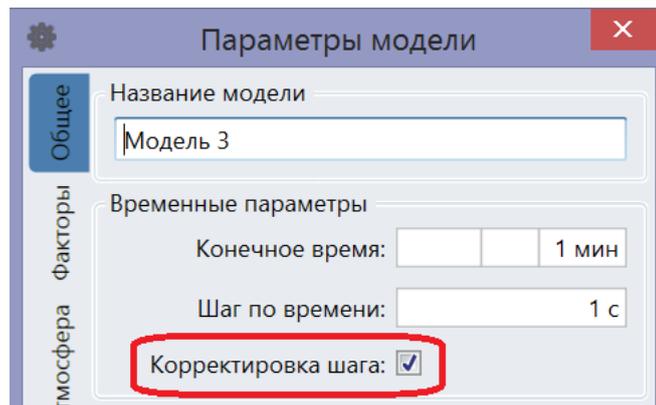
L – длина выработки



К примеру, вышеприведённая сеть представляет собой соединение двух потоков воздуха в 20 и 40 куб. м. в с.,двигающихся по выработкам с площадью поперечного сечения 10 кв. м, и их дальнейшее совместное движение по выработке с поперечным сечением 20 кв. м. Пусть шаг модельного времени задан равным одной секунде. Тогда в левой верхней выработке должно быть выделено пять элементарных объёмов, а в левой нижней – только два (так как это число округляется до целого).



В таком случае разумно предположить, что все теплофизические параметры внутри каждого из таких объёмов однородны, а меняются эти параметры только при переходе от одного объёма к другому. Тогда для получения более точной картины можно уменьшать шаг модельного времени, моделируя большее число элементарных объёмов, или наоборот увеличивать его для ускорения расчёта. Единственным недостатком при этом является то, что в случае малых расходов воздуха требуется учитывать очень большое число участков, поэтому из теплофизического моделирования в программе заведомо исключаются все выработки, расходы в которых меньше 0.1 куб. м. в с. Однако величину минимального ненулевого расхода можно изменить в свойствах модели.



Ещё одним затруднением может быть то, что в каждой из выработок, участвующих в моделировании, нужно иметь возможность выделить хотя бы один элементарный объем воздуха, что подразумевает, что шаг модельного времени нельзя выбрать каким угодно большим. Если в сети присутствует короткая выработка с очень большим расходом, то в этом случае шаг по времени будет ограничен сверху весьма малой величиной, что может серьёзно замедлить расчёт на длительные интервалы времени. В таком случае можно указать, что корректировать шаг модельного времени не требуется. В результате во всех выработках будет гарантированно выделен хотя бы один элементарный объем воздуха, однако скорость его движения может отличаться от реальной в случае коротких выработок с большими расходами. Поэтому при этом нужно обязательно следить, чтобы подобное допущение не приводило к существенному искажению результатов моделирования.

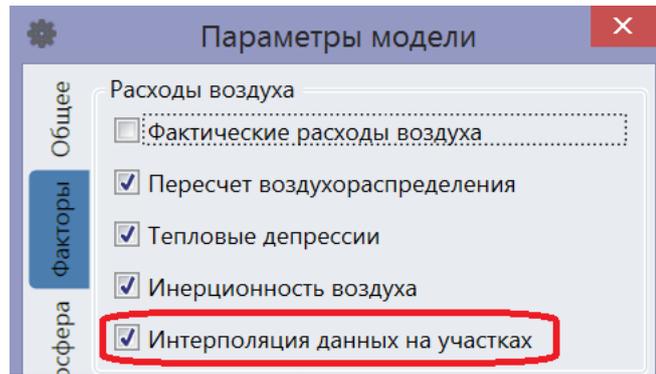
В целом процесс теплофизического моделирования выглядит следующим образом. Модельное время увеличивается дискретно в соответствии с выбранным шагом модельного времени. На каждом шаге тем или иным способом вычисляются расходы в выработках и каждый раз происходит новое разбиение воздуха в выработках на участки, так как расходы в выработках могут меняться. При этом теплофизические параметры на участках на предыдущем шаге модельного времени используются в качестве основы для задания параметров участков на текущем шаге. В самом простом случае теплофизический параметр T_{new} для нового участка с индексом i берётся из участка старого разбиения по следующей формуле.

$$T_{new}[i] = T_{old}\left[i \cdot \frac{n_{old}}{n_{new}}\right]$$

n_{old} – число участков в выработке на предыдущем шаге модельного времени

n_{new} – число участков в выработке на текущем шаге модельного времени

Однако такой способ приводит к появлению уступов в до этого плавно меняющихся теплофизических параметрах при резком увеличении числа участков. Вместо этого в модели может применяться метод, основанный на интерполяции данных на предыдущем шаге.



Если n_{old} – это старое число участков, тогда расстояние между их центрами вычисляется следующим образом.

$$\Delta l_{old_center} = \frac{1}{n_{old} - 1}$$

Затем ищется местоположение центра участка с индексом i на выработке.

$$l_{i_center} = \frac{i + 0.5}{n_{new}}$$

Потом происходит вычисление индексов ближайших старых участков слева и справа.

$$j_{old_left} = (integer) \frac{l_{i_center}}{\Delta l_{old_center}}$$

$$j_{old_right} = j_{old_left} + 1$$

При этом ищутся и расстояния до центров ближайших старых участков.

$$S_{old_left} = l_{i_center} - j_{old_left} \cdot \Delta l_{old_center}$$

$$S_{old_right} = j_{old_right} \cdot \Delta l_{old_center} - l_{i_center}$$

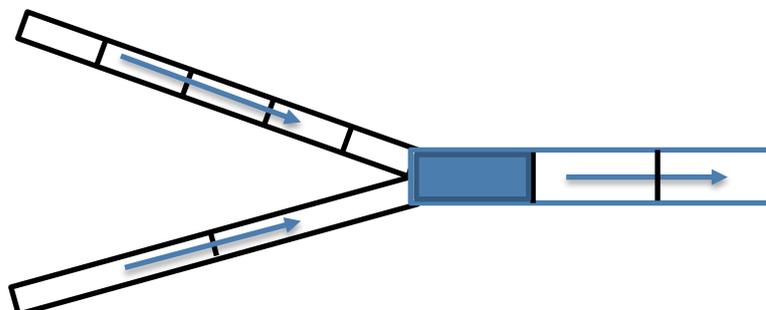
После чего новое значение теплофизического параметра T_{new} для участка с индексом i вычисляется по следующей формуле.

$$T_{new}[i] = \frac{\frac{T_{old}[j_{old_left}]}{S_{old_left}} + \frac{T_{old}[j_{old_right}]}{S_{old_right}}}{\frac{1}{S_{old_left}} + \frac{1}{S_{old_right}}}$$

Подобный метод интерполяции массива теплофизических параметров на старых участках позволяет добиться непрерывности изменения этих параметров при резком увеличении числа участков, однако несколько замедляет процесс моделирования. Поэтому если расходы в выработках в ходе моделирования меняются незначительно, то интерполяцию данных на участках целесообразно отключать.

В ходе моделирования теплофизические параметры на участках некоторым образом меняются в результате влияния разного рода факторов на каждом шаге модельного

времени, а в конце итераций участки в каждой выработке сдвигаются на одну позицию по направлению течения воздуха. При этом в местах слияния воздушных потоков теплофизические параметры на участках пересчитываются с учётом перемешивания воздуха.



Так, например, на вышеприведённой схеме корректировка теплофизических параметров с учётом перемешивания воздуха будет выполняться на участке, закрашенном синим цветом. При этом для таких параметров, как температура и влажность воздуха, а также концентрация газа, корректировка параметров происходит по следующей формуле.

$$T_{mixed} = \frac{\sum Q_i^{input} \cdot T_i}{\sum Q_i^{input}}$$

T_{mixed} – значение температуры, абсолютной влажности воздуха или концентрации газа после перемешивания воздушных потоков

Q_i^{input} – расход воздуха во входящем в узел i -ом потоке

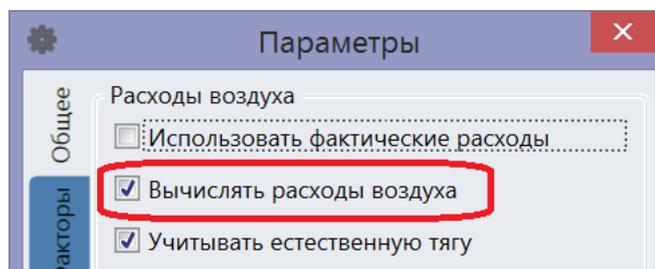
T_i – значение соответствующего теплофизического параметра во входящем в узел i -ом потоке

Кроме того, при учёте температуры и влажности воздуха одновременно оба эти параметра необходимо дополнительно увязывать между собой после смешивания воздуха, чтобы гарантировать, что относительная влажность воздуха не превысит 100% для вычисленной температуры. Более подробно этот процесс описан в разделе, посвящённом источникам влаговыведения.

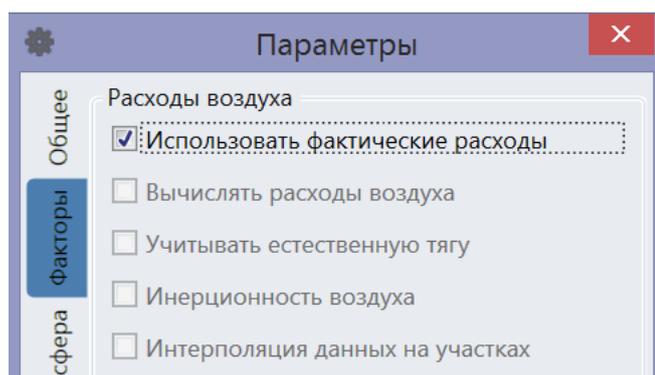
Факторы в теплофизической модели

Самым важным фактором, от которого зависит ход моделирования, является тип используемых в модели расходов. По умолчанию задано, что на каждом шаге модельного времени будет рассчитываться стационарное воздухораспределение, которое должно давать нужные расходы на выработках. Однако подобный подход оказывается избыточным, если есть основания предполагать, что расходы в выработках меняться не

будут. Если просто снять данную опцию, то расчёт стационарного воздухораспределения будет проведён только один раз в самом начале моделирования, а далее на всех остальных итерациях будут использоваться вычисленные модельные расходы.



Однако часто бывает, что сеть выработок не построена так, чтобы расчёт стационарного воздухораспределения мог дать на ней корректные модельные расходы. Например, может быть нарисован только какой-то один участок сети, соответствующий панели рудника, в которой требуется произвести расчёт микроклимата. В таком случае намного проще воспользоваться алгоритмом распределения расходов, а потом сразу использовать эти расходы в теплофизической модели. Для этого следует установить опцию *Фактические расходы*, и расчёт стационарного воздухораспределения производиться не будет.



Кроме того, вместе с опцией пересчёта воздухораспределения деактивируются и галочки *Учитывать естественную тягу* и *Инерционность воздуха*, потому что они теряют свой смысл в случае постоянных расходов.

Учёт естественной тяги означает корректировку расходов в выработках с учётом возникающих в данный момент модельного времени тепловых депрессий. Происходит это аналогично тому, как это делается в расчёте стационарного воздухораспределения, только в теплофизическом расчёте температура воздуха задаётся не в узлах выработок, а вычисляется в каждом элементарном объёме воздуха внутри выработки, и соответственно может меняться в ходе моделирования.

Что касается учёта инерционности воздуха, то он служит для сглаживания резких изменений расходов. К примеру, при реверсировании вентилятора без учёта инерционности расходы в выработках изменились бы моментально, однако, когда этот учёт включён, к напору в каждой выработке при расчёте стационарного

воздухораспределения добавляется величина $\Delta P_{inertia}$, которая вычисляется по следующей формуле.

$$\Delta P_{inertia} = \frac{\rho \cdot L \cdot (Q_{current} - Q_{previous})}{g \cdot S \cdot \Delta t}$$

ρ – плотность воздуха

L – длина выработки

$Q_{current}$ – расход воздуха в выработке на текущем шаге моделирования

$Q_{previous}$ – расход воздуха в выработке на предыдущем шаге моделирования

g – ускорение свободного падения

S – площадь поперечного сечения выработки

Δt – шаг модельного времени

В результате расходы приходят к своим модельным значениям с некоторым запаздыванием.

Что касается того, какие из теплофизических параметров будут отслеживаться для каждого элементарного объёма воздуха в выработках, то каждый из них выбирается отдельной опцией.

Температура воздуха

- Сохранять температуру воздуха
- Источники тепловыделения
- Теплообмен со стенками выработок
- Гидростатическое сжатие воздуха

Влажность воздуха

- Сохранять влажность воздуха
- Источники влаговыделения

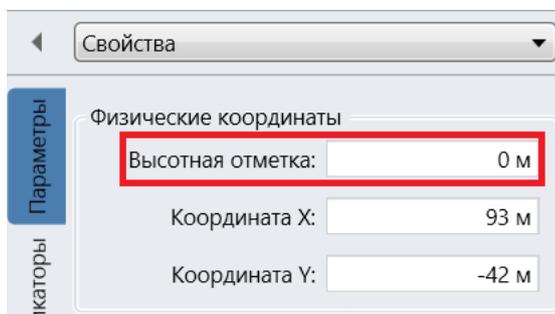
Концентрация газа

- Источники газовыделения

При этом при отключении любого теплофизического параметра в ходе моделирования будет высвобождаться память и процессорное время, поэтому полезно отключать те из них, которые не важны в рамках решаемой задачи.

При включении учёта температуры воздуха в выработках станут доступны дополнительные опции. Первая из них включает или отключает изменение температуры воздуха в выработках в результате теплообмена с источниками тепловыделения, установленными на схеме. Данная опция используется, к примеру, для учёта влияния пожаров, двигателей внутреннего сгорания, кондиционеров и пр. Вторая указывает, нужно

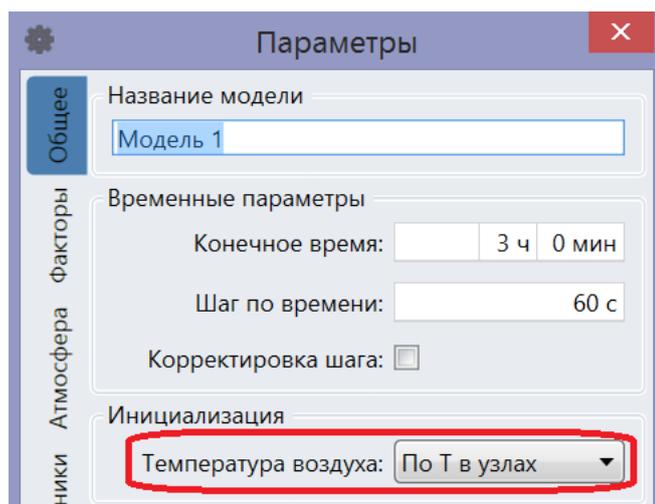
ли моделировать теплообмен со стенками выработок. А третья задаёт необходимость учёта нагревания воздуха вследствие его гидростатического сжатия. При этом температура корректируется аналогично тому, как это делается в модели нестационарного теплообмена с породой за исключением того, что высотная отметка в этом случае задаётся на панели свойств узла на схеме.



Что касается учёта источников влаговыведения, то при их включении влажность воздуха будет меняться в том числе в результате влагообмена со стенками выработок. Учёт же источников газовыведения включает или отключает не только газообмен с соответствующими источниками, но и сам учёт концентрации газа в выработках. Причём моделируется всегда концентрация только какого-то одного неопределённого газа.

Инициализация теплофизической модели

Существует два способа инициализации теплофизических параметров в выработках в начале моделирования. Первый способ связан с использованием параметров, указанных на схеме.



В частности, температура воздуха в элементарных объёмах задаётся, исходя из температуры воздуха в конечных узлах выработки.

Панель параметров и индикаторов. Вкладка 'Индикаторы' активна. Поле 'Температура воздуха' в разделе 'Вентиляция' выделено красной рамкой.

При этом используется следующая формула.

$$T_i^0 = \frac{T_{from} \cdot (n - i) + T_{to} \cdot (i + 1)}{n + 1}$$

T_i^0 – начальная температура воздуха в i -ом участке выработки

n – число участков, выделенных в выработке

T_{from} – температура воздуха в начальном узле выработки

T_{to} – температура воздуха в конечном узле выработки

Что же касается влажности воздуха, то в этом случае она всегда инициализируется на основе значения, указанного в качестве влажности атмосферного воздуха. Концентрация же газа в начальный момент времени считается равной нулю по умолчанию, однако это значение можно также редактировать в параметрах атмосферы.

Диалоговое окно 'Параметры модели'. Вкладка 'Атмосфера' активна. Поля 'Влажность воздуха' и 'Концентрация газа' выделены красной рамкой.

Второй способ инициализации теплофизических параметров связан с использованием уже полученных результатов теплофизического моделирования. В таком случае в качестве начальных берутся параметры участков в конечный момент времени для выбранной модели-предшественницы. Причём в качестве такой модели может выступать и текущая модель, если для неё уже был выполнен теплофизический расчёт.

Инициализация

Температура воздуха: По T в модели

Продолжить от:

Модель 2

Параметры атмосферы

Если в свойствах узла выработки указано, что он имеет связь с атмосферой, то в теплофизической модели на участке, граничащем с этим узлом вдоль направления течения воздуха, всегда будут использоваться теплофизические параметры, соответствующие параметрам атмосферы. В частности, концентрация газа в атмосфере по умолчанию считается равной нулю. Что же касается температуры и влажности воздуха, то они задаются в виде постоянных величин, не меняющихся с течением времени. Такое допущение работает достаточно хорошо в случае проведения теплофизического моделирования для небольших интервалов модельного времени.

Параметры модели

Параметры: Не меняются

Температура воздуха:	20 °C
Влажность воздуха:	75 %
Концентрация газа:	0 %

Если же моделирование проводится для интервалов от двенадцати часов до нескольких суток или же от одного месяца модельного времени, то в таком случае игнорировать колебания параметров атмосферы становится невозможным. В первом случае следует задать суточные колебания температуры и влажности воздуха для моментов времени с интервалом в два часа.

Параметры модели

Параметры: Меняются в течение суток

Период	T воздуха	RH воздуха
00:00	8 °C	80 %
02:00	6 °C	85 %
04:00	4 °C	90 %
06:00	3 °C	90 %
08:00	7 °C	80 %

Во втором же случае достаточно указать лишь усреднённые параметры атмосферы для каждого из двенадцати месяцев в году, так как на таких интервалах времени суточные колебания будут нивелировать друг друга.

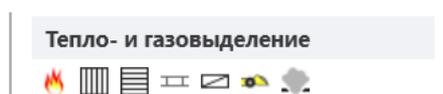
Параметры модели

Параметры: Меняются в течение года

Период	T воздуха	RH воздуха
Январь	2 °C	80 %
Февраль	5 °C	75 %
Март	8 °C	72 %
Апрель	10 °C	70 %
Май	16 °C	68 %

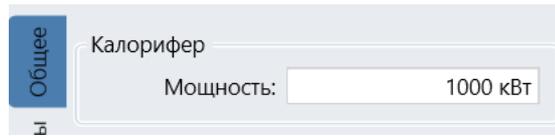
Размещение источников тепло- и газовой выделений на схеме

Включение опции *Источники тепловыделения* в параметрах теплофизической модели позволяет моделировать изменение температуры воздуха в выработках вследствие теплообмена с источниками тепловыделения на схеме, а включение опции *Источники газовой выделений* – изменение концентрации газа. При этом все такие источники нужно предварительно разместить на схеме (категория *Тепло- и газовой выделение* в галерее объектов на выработках).



Все источники тепловыделения делятся на две категории: обобщённые источники, в которых параметры задаются на основе простых формул, и специальные, в которых итоговые свойства выводятся на основе проектных параметров источников. В категорию простых источников тепловыделения попадают калориферная и холодильная установки,

у которых мощность нагревания и остывания проходящего через них воздуха указывается непосредственно.



В таком случае для пересчёта температуры воздуха на участках, граничащих с калориферной или холодильной установкой, используется следующая формула.

$$T_i^{n+1} = T_i^n + L_{portion} \cdot \frac{W_{part} \cdot \Delta t}{c \cdot \rho \cdot S \cdot L_{part}}$$

T_i^{n+1} – температура на i -ом участке после теплообмена с источником тепловыделения

T_i^n – температура на i -ом участке до теплообмена с источником тепловыделения

$L_{portion}$ – доля (от 0 до 1), которую занимает область теплообмена с источником на текущем участке

W_{part} – мощность нагревания (остывания) воздуха у источника, приходящаяся на длину одного участка

Δt – время теплообмена

c – удельная теплоемкость воздуха

ρ – плотность воздуха

S – площадь поперечного сечения выработки

L_{part} – длина одного участка

Чтобы вычислить $L_{portion}$, сначала ищутся границы расположения источника тепловыделения в выработке L_{start} и L_{end} .

- 1) По умолчанию границы источника указываются, совпадающими с границами выработки.

$$L_{start} = 0$$

$$L_{end} = 1$$

- 2) Если протяжённость источника меньше длины выработки, то вычисляется местоположение центра источника L_{center} .

$$L_{center} = L_{relative} \cdot L_{rib}$$

$L_{relative}$ – относительное местоположение источника вдоль длины выработки (от 0 до 1)

L_{rib} – длина выработки

- a. Если источник не помещается в выработку слева ($L_{center} - \frac{L_{source}}{2} < 0$, L_{source} – протяжённость источника)

$$L_{end} = \frac{L_{source}}{L_{rib}}$$

- b. Если источник не помещается в выработку справа ($L_{center} + \frac{L_{source}}{2} > L_{rib}$)

$$L_{start} = 1 - \frac{L_{source}}{L_{rib}}$$

- c. Если источник помещается в выработку целиком

$$L_{start} = L_{relative} - \frac{L_{source}}{2 \cdot L_{rib}}$$

$$L_{end} = L_{relative} + \frac{L_{source}}{2 \cdot L_{rib}}$$

- 3) Если протяжённость источника больше длины выработки, то границы источника обрезаются по размерам выработки.

Причём, если не указано иное, протяжённость источника L_{source} считается равной двум метрам.

Когда найдены границы L_{start} и L_{end} , становится возможным определить мощность теплообмена, приходящуюся на длину одного участка.

$$W_{part} = \frac{L_{part}}{(L_{end} - L_{start}) \cdot L_{rib}} \cdot W$$

L_{part} – длина одного участка в выработке

W – заданная мощность источника

Кроме того, появляется возможность вычислить значение $L_{portion}$, зная границы L_{part_start} и L_{part_end} у текущего участка.

- 1) Если источник находится правее ($L_{part_end} < L_{start}$), тогда $L_{portion} = 0$.
- 2) Если источник находится левее ($L_{part_start} > L_{end}$), тогда $L_{portion} = 0$.
- 3) Если участок помещается внутри источника целиком ($L_{start} \leq L_{part_start}$ и $L_{part_end} \leq L_{end}$), тогда $L_{portion} = 1$.
- 4) Если источник выходит за границу участка справа ($L_{end} > L_{part_end}$), тогда

$$L_{portion} = \frac{L_{part_end} - L_{start}}{L_{part_end} - L_{part_start}}$$

- 5) Если источник выходит за границу участка слева, тогда

$$L_{portion} = \frac{L_{end} - L_{part_start}}{L_{part_end} - L_{part_start}}$$

Вышеприведённый точный способ учёта пересечений участков с областями теплообмена в выработках позволяет обеспечить получение достоверных результатов даже при условии выделения очень малого числа участков.

В случае же таких специальных источников тепловыделения, как пожар и двигатель внутреннего сгорания, будут использоваться те же самые формулы, только мощность источников будет вычисляться при помощи соответствующих формул.

Для пожара задаётся его мощность и протяжённость, после чего используется та же самая формула, что и для калориферной установки, только в этом случае L_{source} считается равной не двум метрам, а введенной протяженности пожара.

Для двигателя внутреннего сгорания мощность тепловыделения рассчитывается при помощи следующей формулы.

$$W = \frac{P_{consumption} \cdot C_{combustion} \cdot 1000}{3600}$$

$P_{consumption}$ – средний расход топлива в кг в час

$C_{combustion}$ – удельная теплота сгорания топлива в МВт/кг

Причём средний расход топлива задаётся не явным образом, а в свою очередь рассчитывается на основе следующих параметров, значения которых берутся из справочников.

$$P_{consumption} = W_{engine} \cdot p_{consumption} \cdot firregularity$$

W_{engine} – номинальная мощность двигателя внутреннего сгорания в кВт

$p_{consumption}$ – удельный расход топлива в кг на кВт·ч

$f_{irregularity}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий неравномерность работы двигателя

Протяжённость источника теплообмена в случае двигателя внутреннего сгорания принимается равной двум метрам.

Помимо всего прочего, двигатель внутреннего сгорания может выступать и в качестве потребителя кислорода, если газ, концентрация которого рассчитывается в модели, считается кислородом.

Индикаторы	Общие
Двигатель внутреннего сгорания	
Удельная теплота сгорания топлива:	42,7 МДж/кг
Расход топлива:	0,2 кг/кВт.ч
Мощность:	150 кВт
Использование:	100 %
Потребление O2:	<input checked="" type="checkbox"/>

По умолчанию двигатель никак не влияет на концентрацию газа в выработке, однако при включении соответствующей опции, интенсивность потребления газа будет рассчитываться по следующей формуле.

$$E_{emission} = - \frac{P_{consumption} \cdot m_{oxygen}}{\rho_{air} \cdot 3600}$$

$E_{emission}$ – интенсивность потребления кислорода двигателем внутреннего сгорания в м³ в секунду

$P_{consumption}$ – средний расход топлива в кг в час

ρ_{air} – плотность воздуха

m_{oxygen} – масса кислорода, необходимая для сжигания одного кг топлива (принимается равной 14.42 кг кислорода на 1 кг топлива)

Индикаторы	Общие
Привод конвейера	
W привода:	25 кВт
% в тепловыделении конвейера:	15 %

Индикаторы	Общие
Конвейерная лента	
W привода:	25 кВт
% в тепловыделении конвейера:	85 %
Длина ленты:	500 м

В случае конвейера вся потребляемая им мощность на приводе расходуется в основном в результате тепловыделения на разных участках этого конвейера. Так, по умолчанию считается, что сам привод выделяет в виде тепла 15% от своей номинальной мощности, а лента конвейера - 85%. Однако эти соотношения можно задать вручную в свойствах

соответствующих объектов. В остальном же расчёт конвейера ничем не отличается от простого источника тепловыделения.

Что же касается источников газовойделения, то у них задаётся протяжённость источника, а также итоговая интенсивность газовойделения. При этом концентрация газа в каждом участке выработки пересчитывается следующим образом.

$$C_i^{n+1} = \frac{C_i^n \cdot V_{part} + L_{portion} \cdot V_{part_gas}}{V_{part}}$$

C_i^{n+1} – концентрация газа (от 0 до 1) на i -ом участке после газообмена

C_i^n – концентрация газа (от 0 до 1) на i -ом участке до газообмена

V_{part} – объем i -го элементарного объема

$L_{portion}$ – доля (от 0 до 1), которую занимает область газообмена на текущем участке

V_{part_gas} – объем выделившегося газа за время газообмена

Причём величина $L_{portion}$ рассчитывается аналогично тому, как это делается для источников тепловыделения. Что же касается объема выделившихся газов V_{part_gas} , то он вычисляется по следующей формуле.

$$V_{part_gas} = \frac{E_{emission} \cdot \Delta t \cdot L_{part}}{(L_{end} - L_{start}) \cdot L_{rib}}$$

$E_{emission}$ – общая интенсивность газовойделения

Δt – время газообмена

L_{part} – длина одного участка

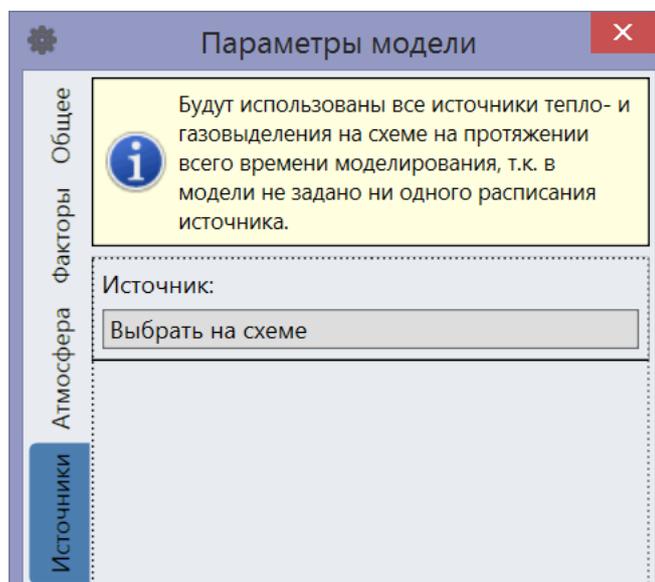
L_{start} – относительное расположение (от 0 до 1) начала области газовойделения в выработке

L_{end} – относительное расположение (от 0 до 1) окончания области газовойделения в выработке

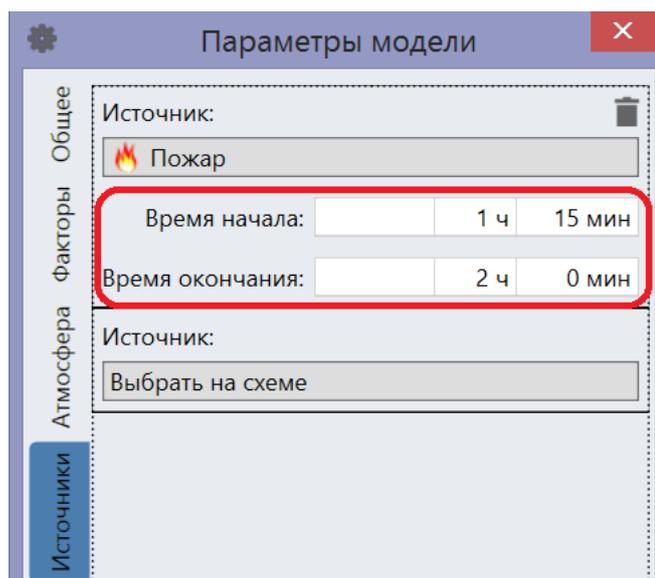
L_{rib} – длина выработки

Причём L_{start} и L_{end} рассчитывается аналогичным с источниками тепловыделения способом.

По умолчанию все источники тепло- и газовой выделений, расположенные на схеме, начинают свою работу в начальный момент времени и действуют на протяжении всего периода моделирования, о чём сообщает соответствующая надпись на вкладке *Расписания* в свойствах теплофизической модели.



Однако иногда бывает необходимо задать расписание работы каждого источника по отдельности. В таком случае в модели будут учитываться только те источники, у которых указано расписание их работы. Чтобы создать такое расписание, достаточно выбрать источник на схеме. После чего в список добавится расписание работы выбранного источника.



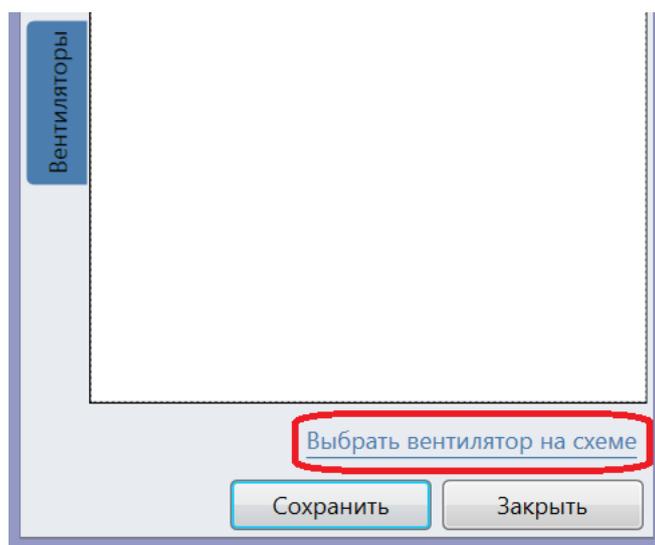
По умолчанию поля с временем начала и окончания действия источника будут пустыми. Это означает, что источник будет работать на протяжении всего времени моделирования.

Если же указать, к примеру, только время начала, то источник начнёт работать с указанного момента модельного времени до окончания моделирования. Если же требуется, чтобы источник работал какое-то время, потом прекратил свою работу, а затем снова её начал, то в этом случае допускается добавлять несколько расписаний для одного и того же источника.

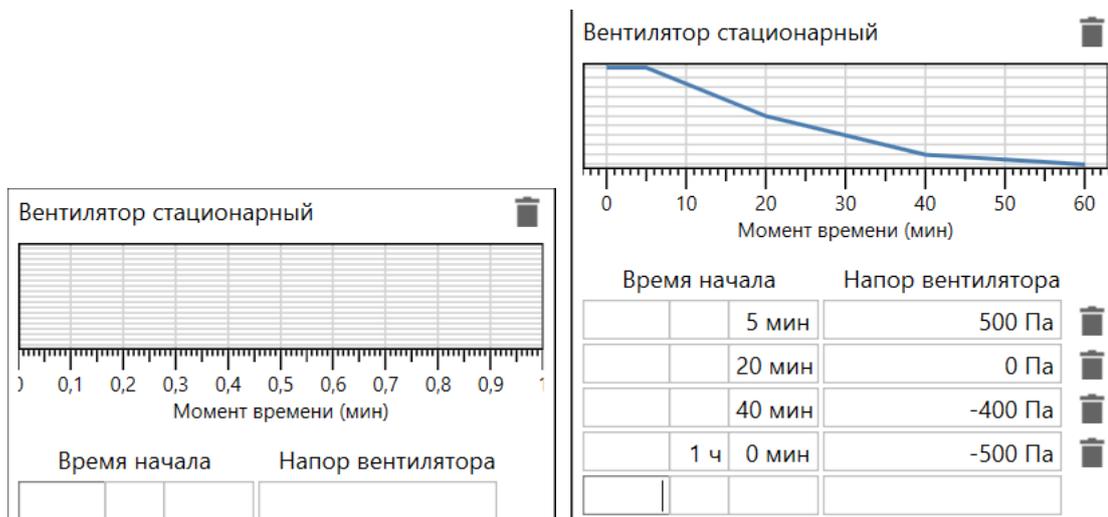
Возможность гибко настраивать время действия источников тепло- и газовой выделения позволяет моделировать, например, самые разные сценарии развития пожаров в руднике.

Изменение напора вентиляторов во времени

Помимо настройки моментов включения и отключения источников тепло- и газовой выделения бывает необходимо указать то, как меняется напор вентиляторов с течением времени. К примеру, это требуется при моделировании реверса вентилятора главного проветривания или при любом другом изменении режима его работы. Для этого сначала нужно щёлкнуть на кнопку *Добавить расписание* на вкладке *Вентиляторы* у формы параметров теплофизической модели, а затем выбрать нужный вентилятор на схеме.



После чего станет возможным заполнить список напоров вентилятора с привязкой к моментам модельного времени. При этом для всех промежуточных моментов времени напор вентилятора будет интерполироваться между указанными значениями. Оценить схему изменения напора вентилятора можно при помощи графика сверху. Чтобы добавить новую точку с привязкой напора вентилятора к моменту модельного времени, нужно просто начать вводить значения в пустые поля внизу списка.



Способы расчёта теплообмена с породой в выработках

Если в теплофизической модели включена опция *Теплообмен со стенками выработок*, то температура воздуха на участках будет пересчитываться с учётом взаимодействия с окружающей выработку породой. При этом предусмотрены два основных способа расчёта подобного теплообмена: при помощи коэффициента теплоотдачи у стенок и при помощи коэффициента нестационарного теплообмена. В первом случае коэффициент теплоотдачи задаётся на основе справочных значений, но при этом необходимо указывать также и температуру стенок. Во втором случае, температура стенок роли не играет, а рассчитывается коэффициент нестационарного теплообмена по замеренному перепаду температуры воздуха в выработке для определённого расхода и температуры нетронутой породы.

Использование коэффициента теплоотдачи у стенок выработки

По умолчанию теплообмен со стенками рассчитывается на основе проектных данных с использованием коэффициента теплоотдачи у стенок выработки.

Теплообмен со стенками

Задается: **Проектными данными...**

Теплоотдача: 5 Вт/м²

При Q: 10 м³/с

Т стенок: По Т стенок в узлах

Влагообмен

Тип: Влагообмена нет

Причём данный коэффициент указывается всегда для какого-то определённого расхода воздуха. Когда же расход меняется, данный коэффициент пересчитывается при помощи следующей формулы.

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{0.8}$$

α – коэффициент теплоотдачи у стенок выработки при расходе воздуха, равном Q

α_0 – указанный пользователем коэффициент теплоотдачи при расходе, равном Q_0

Когда вычислен фактический коэффициент теплоотдачи у стенок α , температура воздуха на участках рассчитывается при помощи той же самой формулы, которая используется для пересчёта температуры воздуха в одномерной модели нестационарного теплообмена в породе.

$$T_{air}^n = \frac{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot V_{air} \cdot T_{air}^{n-1} + \alpha \cdot S \cdot \Delta t \cdot T_{wall}}{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot V_{air} + \alpha \cdot S \cdot \Delta t}$$

T_{air}^n – неизвестная температура воздуха на текущем участке на текущем шаге модельного времени

T_{air}^{n-1} – известная температура воздуха на текущем участке на предыдущем шаге модельного времени

ρ_{air} – плотность воздуха

c_{air} – удельная теплоемкость воздуха

V_{air} – объем воздуха на текущем участке

T_{wall} – температура стенок выработки в том месте, где находится текущий участок

S – площадь соприкосновения текущего элементарного объёма со стенками выработки

Δt – время теплообмена со стенками выработки

При этом температура стенок по умолчанию рассчитывается на основе температуры, заданной в узлах выработок (*Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Конечные вершины (индикаторы) -> Фактическая температура стенок выработок*).

Для этого используется следующая формула.

$$T_{wall}[i] = \frac{T_{wall_from} \cdot (n - i) + T_{wall_to} \cdot (i + 1)}{n + 1}$$

$T_{wall}[i]$ – температура стенок выработки рядом с i -ым участком

T_{wall_from} – температура стенок в начальном узле выработки

T_{wall_to} – температура стенок в конечном узле выработки

n – общее число участков в выработке

Подключение модели нестационарного теплообмена с породой

Однако непосредственное задание температуры стенок у выработок далеко не всегда возможно, так как это связано с выполнением замеров. Кроме того, эта температура может отличаться от температуры воздуха на какие-то доли градуса, что очень сложно зафиксировать приборами. В этом случае следует воспользоваться результатами моделирования нестационарного теплообмена с породой в одномерной постановке, потому что, с одной стороны, он может быть проведён исключительно на основе проектных данных, а, с другой стороны, позволяет получить температуру стенок для любого времени с момента прокладки выработки внутри нетронутой породы.

Теплообмен со стенками

Задается: Проектными данными

Теплоотдача: 5 Вт/м²

При Q: 10 м³/с

Т стенок: По T стенок в модели

Модель: Охлаждение вентиляционного штрека

Начать с: Через месяц после прокладки

[Просмотреть](#)

Тип модели: Динамическая

В таком случае сначала выбирается подходящая модель теплообмена с породой, а потом – вычисленный результат для определённого модельного времени, в котором уже будет информация о температуре стенок выработки. Подробнее выбранный результат моделирования теплообмена с породой можно посмотреть при помощи соответствующей кнопки снизу.

Начать с: Через месяц после прс

[Просмотреть](#)

По умолчанию будет считаться, что полученная температура стенок при дальнейшем теплофизическом моделировании в сетевой постановке меняться не будет. Это бывает оправданно для небольших интервалов моделирования, однако при увеличении таких интервалов хотя бы до нескольких месяцев игнорировать нестационарный теплообмен с

породой становится невозможным. В этом случае достаточно включить динамический тип модели.

Начать с: [Просмотреть](#)
Тип модели: Динамическая

Тогда на каждом шаге теплофизического моделирования в сетевой поставке будет происходить выполнение соответствующей итерации для указанной одномерной модели теплообмена с породой, начиная с выбранного теплораспределения. В этом случае возникает сетевая модель нестационарного теплообмена с породой, в которой можно указывать, для каких именно выработок следует пересчитывать теплораспределение внутри породы. Это позволяет серьёзно ускорить вычисления, потому что чаще всего существенным образом теплораспределение меняется только у ограниченного числа выработок, находящихся вблизи от воздухоподающего ствола. У всех же остальных выработок без ущерба для точности вычислений можно указать, что теплораспределение внутри породы у них не меняется.

Тип модели: Динамическая
Сохранение: На каждой итерации

Если же необходимо ещё и сохранять динамику теплораспределения, чтобы иметь возможность позже просматривать её для каждого шага модельного времени, то для этих целей предусмотрена соответствующая опция.

Использование коэффициента нестационарного теплообмена

Альтернативным способом расчёта теплообмена со стенками выработок является вычисление коэффициента нестационарного теплообмена.

Теплообмен со стенками
Задается:
Т массива:
Расход:
ΔТ воздуха:
Вычисленные параметры
Коэффициент нестационарного теплообмена:

Для этого необходимо иметь данные о фактическом перепаде температуры воздуха в выработке при определённом расходе, а также о температуре нетронутого массива

породы рядом с выработкой. В таком случае коэффициент нестационарного теплообмена K вычисляется следующим образом.

$$K = \frac{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot Q^*}{P \cdot L} \cdot \ln \left(1 + \left| \frac{T_{result} - T_{initial}}{T_{rock}} \right| \right)$$

ρ_{air} – плотность воздуха

c_{air} – удельная теплоёмкость воздуха

Q^* – расход в выработке, для которого указано изменение температуры воздуха

P – периметр поперечного сечения выработки

L – длина выработки

T_{result} – температура воздуха в выработке после теплообмена со стенками

$T_{initial}$ – температура воздуха в выработке до теплообмена со стенками

T_{rock} – температура нетронутой породы рядом с выработкой

Вычисленное значение коэффициента нестационарного теплообмена отображается на панели свойств выработки. Кроме того, есть возможность включить отображение соответствующего индикатора на схеме (Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Выработки (индикаторы) -> Коэффициент нестационарного теплообмена).

Вычисленные параметры	
Коэффициент нестаци-го теплообмена:	9,2579 Вт/м2.К

Когда значение K вычислено для каждой выработки, пересчёт температуры воздуха на участках происходит при помощи следующей формулы.

$$T_i^{n+1} = \frac{T_i^n + T_{rock} \left(e^{\frac{K \cdot P \cdot L}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot Q}} - 1 \right)}{e^{\frac{K \cdot P \cdot L}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot Q}}}$$

T_i^{n+1} – температура воздуха на i -ом участке после теплообмена со стенками

T_i^n – температура воздуха на i -ом участке до теплообмена со стенками

Q – текущий расход в выработке

Таким образом, коэффициент нестационарного теплообмена позволяет предсказывать перепад температуры для расходов Q , отличающихся от того расхода, для которого K был вычислен.

Задание источников влаговыведения

В случае включения опции *Источники влаговыведения* в окне параметров теплофизической модели будет происходить пересчёт влажности воздуха на участках выработки. При этом учитываться будет всегда абсолютная влажность воздуха AH , а относительная влажность воздуха RH будет рассчитываться при помощи следующей формулы.

$$P_{saturated} = 100 \cdot 6.1094 \cdot e^{\frac{17.625 \cdot T}{T + 243.04}}$$
$$RH = \frac{AH \cdot R_{air} \cdot (T + 273.15)}{P_{saturated}} \cdot 100$$

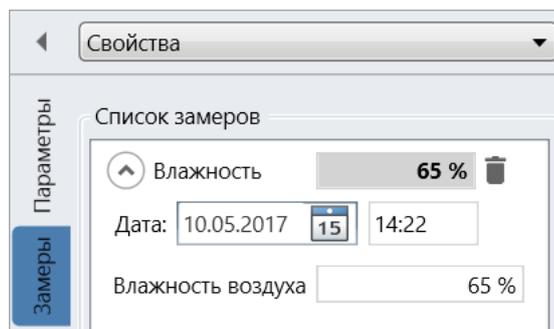
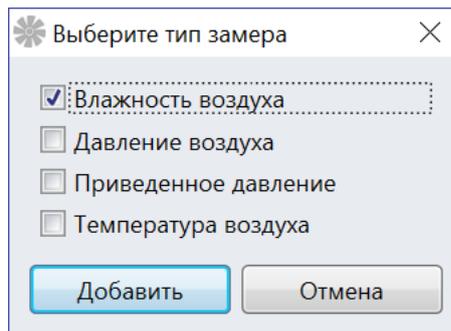
$P_{saturated}$ – давление насыщенного водяного пара при указанной температуре воздуха

T – текущая температура воздуха в градусах Цельсия

В отличие от источников тепло- и газовой выработки влаговыведение задаётся как свойство выработки.



При этом есть два способа задания его интенсивности. Первый способ основан на измерении перепада относительной влажности воздуха в выработке при определённом расходе воздуха. Для этого фактическая влажность воздуха задаётся в каждом из конечных узлов выработки.



После чего интенсивность испарения рассчитывается при помощи следующей формулы.

$$E = (AH_{result} - AH_{initial}) \cdot Q^*$$

AH_{result} – итоговая абсолютная влажность воздуха в выработке

$AH_{initial}$ – начальная абсолютная влажность воздуха в выработке

Q^* - расход, при котором было задано изменение влажности воздуха

Затем вычисляется удельный коэффициент влаговыделения, который нивелирует площадь, с которой происходило испарение влаги, а также изменение скорости испарения в зависимости от начальной влажности воздуха.

$$k_e = \frac{E}{S_{surface} \cdot \left(1 - \frac{RH_{initial}}{100}\right) \cdot P_{saturated}(T)}$$

$S_{surface}$ – площадь поверхности испарения

$RH_{initial}$ – относительная влажность воздуха до испарения в него влаги

$P_{saturated}(T)$ – давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха T

Причём площадь поверхности рассчитывается как доля от площади стенок выработки. По умолчанию считается, что испарение происходит со всей площади стенок, поэтому соответствующая доля равна 100%.

Влагообмен

Тип: Испарение воды

Задается: Фактическим замером

ΔRH : -5 %

$T_{\text{сред}}$: 20 °C

$S_{\text{стенок}}$: 1920 м2

Скорость испарения: 0 с/м

Расход: 5 м3/с

Площадь испарения: 100 %

$T_{\text{воздуха}}$: Пересчитывать

Вторым же способом задания интенсивности испарения является непосредственное задание коэффициента k_e в свойствах выработки.

Влагообмен

Тип: Испарение воды

Задается: Проектными данными

Скорость испарения: 0 с/м

Расход: 5 м3/с

Площадь испарения: 100 %

Когда коэффициент k_e задан для всех выработок, в которых происходит испарение влаги, пересчёт абсолютной влажности воздуха на участках происходит следующим образом.

$$AH_i^{n+1} = AH_i^n + k_e \cdot S_{surface} \cdot \left(1 - \frac{RH_i}{100}\right) \cdot P_{saturated}(T_i) \cdot \frac{\Delta t}{V_i}$$

AH_i^{n+1} – абсолютная влажность воздуха после испарения влаги на i -ом участке

AH_i^n – абсолютная влажность воздуха до испарения влаги на i -ом участке

RH_i – относительная влажность воздуха на i -ом участке до испарения

Δt – время влагообмена

V_i – выделенный элементарный объем воздуха

Так как скорость испарения стремится к нулю при приближении относительной влажности воздуха к ста процентам, поэтому относительная влажность воздуха после испарения никогда не превысит ста процентов. Однако такое может произойти вследствие резкого охлаждения насыщенного влагой воздуха вследствие работы воздухоохладительной установки или в процессе перемешивания потоков воздуха с разной температурой. В таком случае это будет приводить к выпадению росы, которое будет сопровождаться увеличением температуры воздуха. Поэтому при пересчёте температуры воздуха на участках абсолютная влажность воздуха дополнительно корректируется следующим образом.

- 1) Если температура воздуха выросла, значит корректировать температуру и влажность не нужно, так как роса выпадать не будет.
- 2) Если температура воздуха снизилась
 - a. Если относительная влажность воздуха для текущей температуры меньше ста процентов, то корректировка также не требуется.
 - b. Если относительная влажность воздуха для текущей температуры получилась равной ста процентам (или больше), то вычисляется, какое количество росы должно выпасть. Для этого решается следующее уравнение.

$$RH \left(AH - dAH, T + \frac{dAH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}} \right) = 100$$

$RH(AH, T)$ – формула для вычисления относительной влажности

AH – нескорректированная абсолютная влажность воздуха

dAH – плотность выпавшей росы

T – нескорректированная температура воздуха

L_{water} – скрытая теплота испарения воды

ρ_{air} – плотность воздуха

c_{air} – удельная теплоёмкость воздуха

После решения этого уравнения вычисляются скорректированная температура T^* и влажность воздуха AH^* .

$$T^* = T + \frac{dAH \cdot L_{water}}{\rho_{air} \cdot c_{air}}$$

$$AH^* = AH - dAH$$

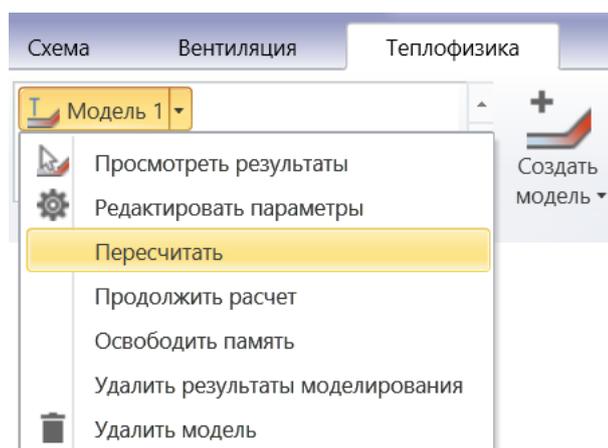
Кроме того, в процессе испарения влаги в выработке происходит снижение температуры неиспарившейся жидкости. Если считать, что весь образовавшийся недостаток теплоты в конечном счёте будет компенсирован отъёмом теплоты у проходящего мимо воздуха (а такое происходит в случае, когда жидкость распылена в виде капель и успевает испариться, не достигая дна выработки), то следует включить пересчёт температуры воздуха в выработке после испарения.

В этом случае температура воздуха на участках будет корректироваться следующим образом.

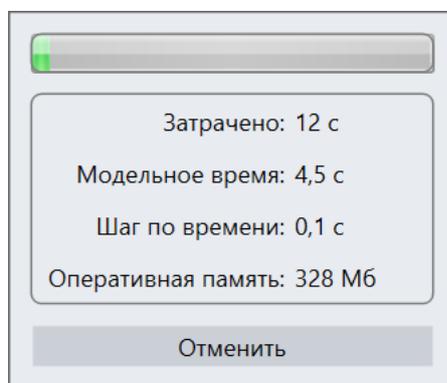
$$T_i^* = T_i - \frac{L_{water} \cdot dAH}{\rho_{air} \cdot c_{air}}$$

Расчёт теплофизической модели

Чтобы произвести теплофизическое моделирование, следует воспользоваться соответствующей командой из выпадающего меню у модели.

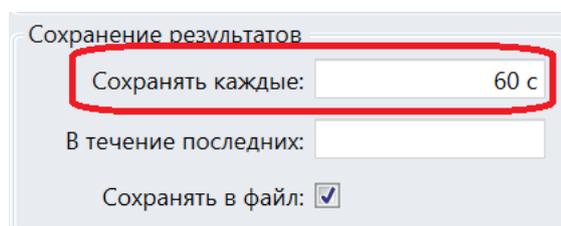


В процессе моделирования будет отображаться специальное окно, в котором можно следить за текущим временем моделирования, фактическим шагом модельного времени, а также за объёмом потребляемой памяти.



Реальный шаг модельного времени весьма важен, потому что он может выбираться крайне малым в случае включения его корректировки в свойствах теплофизической модели. В таком случае для ускорения расчёта следует отключить проверку шага и следить за корректностью результатов моделирования самостоятельно.

Кроме того, в ходе моделирования сохраняется очень большой объём вычисленных результатов, что может приводить к переполнению памяти на больших сетях и длительных периодах моделирования.



Чтобы это предотвратить, для начала следует выбирать как можно больший шаг сохранения результатов моделирования в окне с параметрами модели. К примеру, шаг модельного времени может быть пять секунд, а шаг сохранения – шестьдесят, в этом случае сохранение результатов будет происходить только для каждого двенадцатого шага модельного времени.

Сохранение результатов

Сохранять каждые: 60 с

В течение последних:

Сохранять в файл:

В дополнение к этому, в свойствах модели можно указать, что сохранять результаты нужно только за какой-то определённый период времени от окончания моделирования. Это помогает радикально снизить требования к объёму памяти в случае, если интересна не сама динамика теплофизических параметров, а лишь конечный результат.

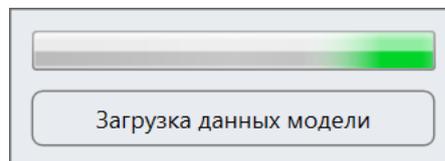
Кроме того, можно ограничить максимальное число участков в каждой выработке при сохранении путём интерполяции данных.

Ограничить число участков

Макс. число участков: 100

Сохранение и загрузка результатов расчёта

Результаты теплофизического моделирования сохраняются в файл вместе схемой, что может занимать значительное время, если моделирование проводилось для продолжительных интервалов времени.



При последующем открытии схемы из файла результаты моделирования будут подгружаться по мере надобности при просмотре соответствующих моделей. Однако иногда наиболее удобным является полное отключение сохранения результатов моделирования в файл. Это бывает особенно полезно в тех случаях, когда время сохранения и последующей загрузки результатов из файла превышает время самого моделирования.

Сохранение результатов

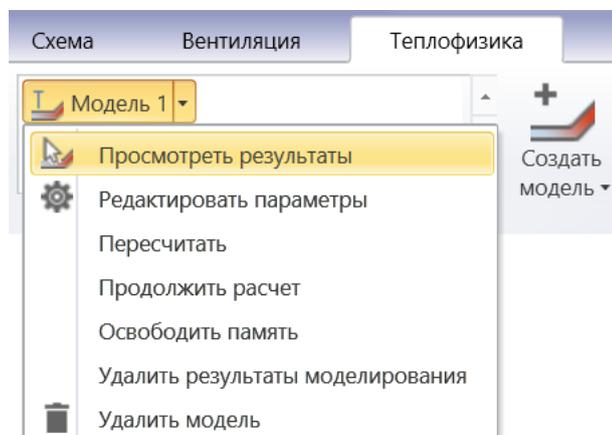
Сохранять каждые: 60 с

В течение последних:

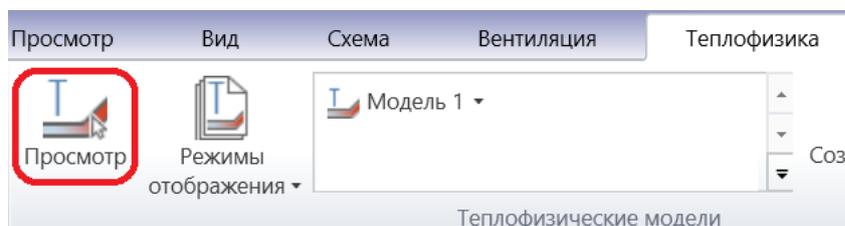
Сохранять в файл:

Просмотр результатов теплораспределения

Если у теплофизической модели был проведён расчёт, то его результаты можно посмотреть при помощи соответствующей команды из меню модели.



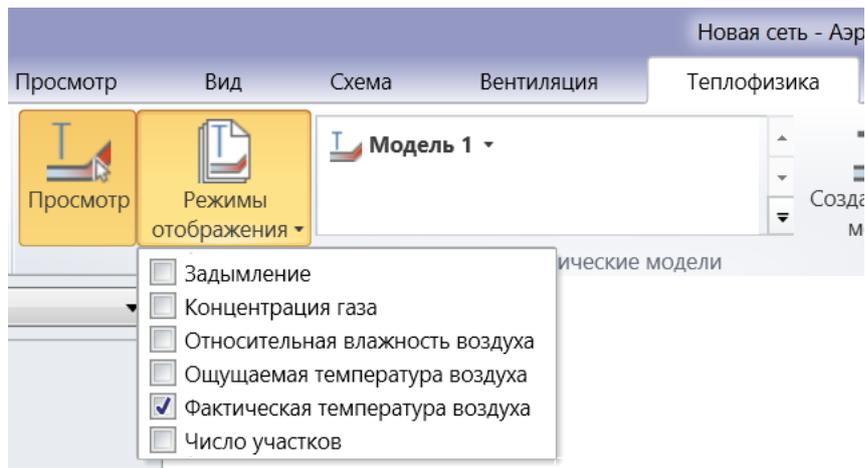
То же самое можно сделать, просто нажав на кнопку с именем модели. Кроме того, результаты последней просмотренной модели отображаются при нажатии на кнопку *Просмотр* на вкладке *Теплофизика*. Чтобы выйти из режима просмотра, достаточно снова нажать на ту же кнопку *Просмотр*.



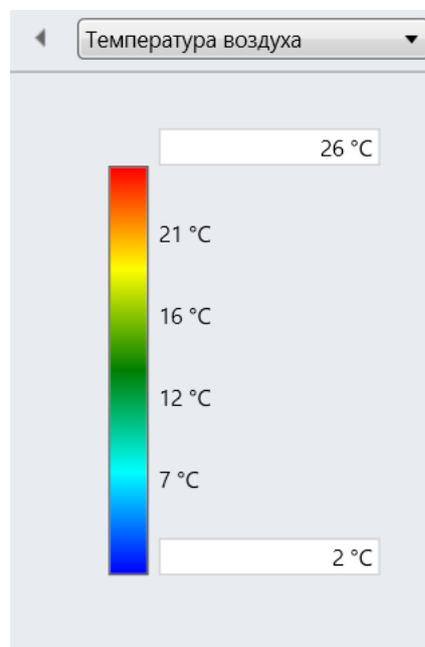
После включения просмотра результатов теплофизического моделирования в строке состояния появится поле с текущим модельным временем, а также ползунок справа от него.



Текущее модельное время можно менять, как вводя точное его значение, так и просто перетаскивая этот ползунок. При этом графическое представление результатов моделирования будет отображаться именно для выбранного таким образом момента модельного времени.



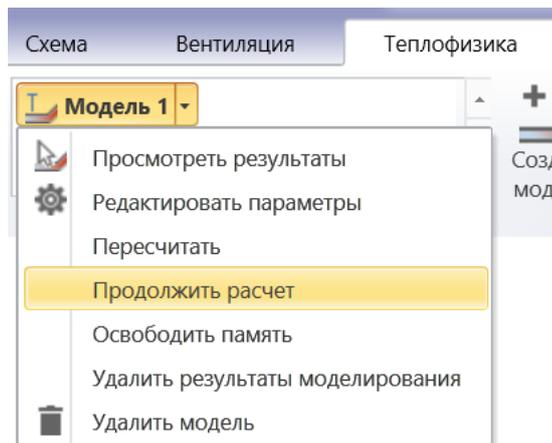
Графическое представление результатов настраивается путём включения или отключения опций в меню *Режимы отображения* на вкладке *Теплофизика*.



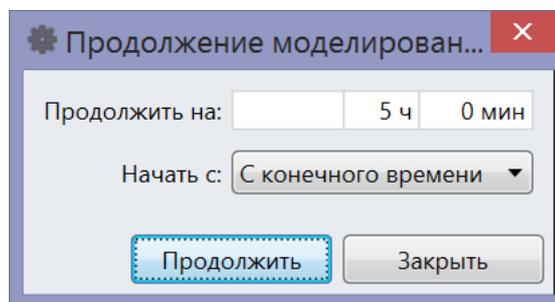
При этом большинство режимов отображения включают или отключают разного рода градиентную закрашку выработок, параметры которой отображаются на боковой панели. Что же касается просмотра результатов моделирования для конкретных выработок на схеме, то они отображаются в отдельных окнах, которые открываются по двойному щелчку на выработках в режиме просмотра.

Продолжение моделирования с определённой точки

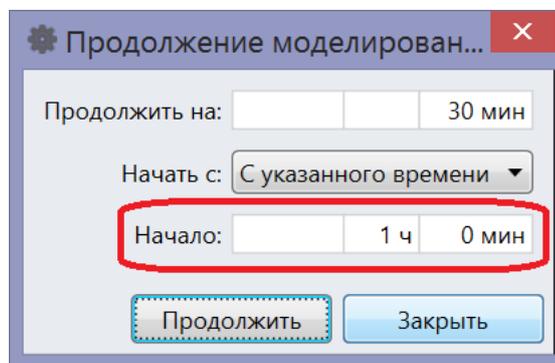
Иногда во время просмотра результатов теплофизического моделирования обнаруживается, что конечное время моделирования было выбрано слишком малым. А иногда бывает необходимо что-то изменить на схеме, а затем снова продолжить моделирование. Сделать все это можно при помощи одноименной кнопки в выпадающем меню у модели.



В этом случае расчёт начнётся не с самого начала, а с того момента модельного времени, которое укажет пользователь.



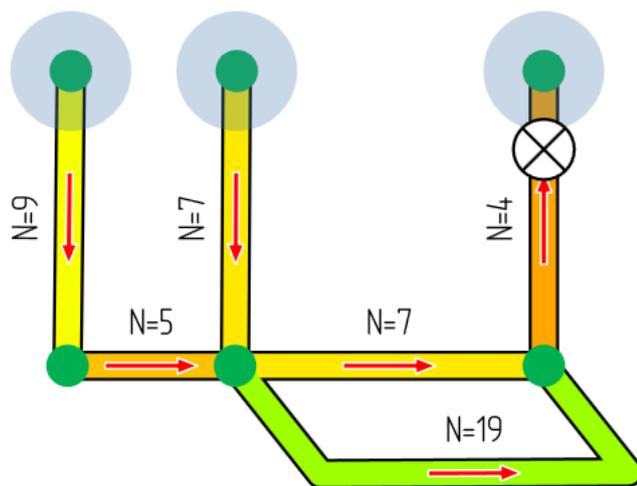
По умолчанию моделирование будет продолжено с предыдущего конечного времени, но есть возможность выбрать этот момент времени самостоятельно.



Если при этом будет выбрано такое начальное время для продолжения моделирования, которое будет меньше конечного времени предыдущего моделирования, то все перекрывающиеся результаты будут обновлены.

Отображение числа участков у выработок

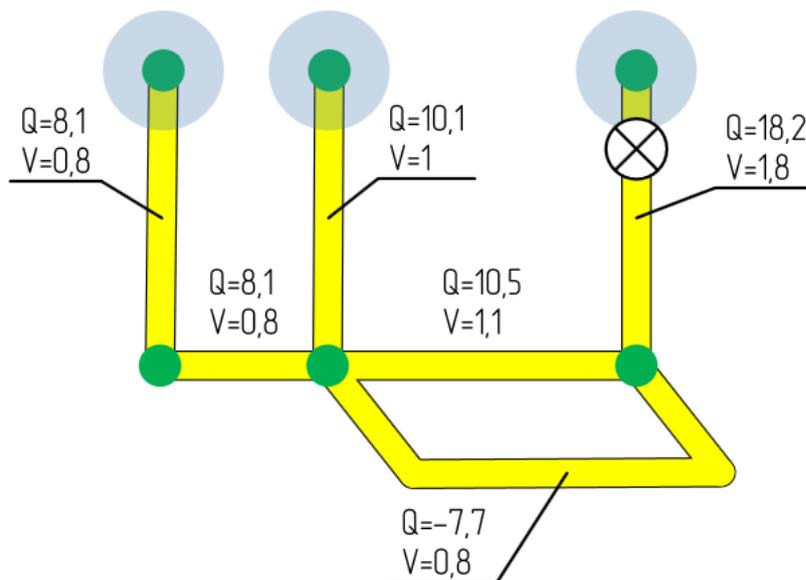
Проверку результатов теплофизического моделирования полезно начинать с отображения количества участков, выделенных в выработках (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Число участков*).



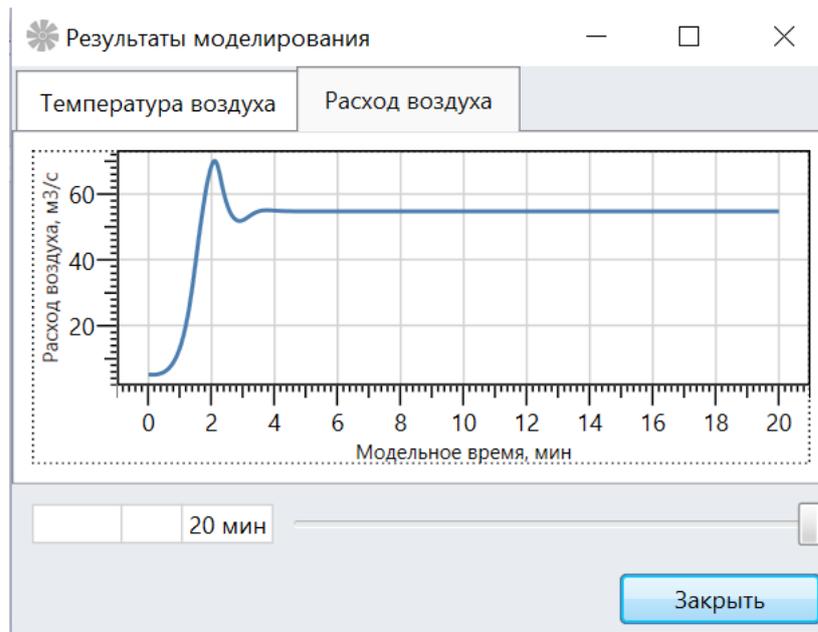
В этом случае красным будут закрашиваться выработки с очень малым числом участков (меньше пяти), при котором результаты моделирования могут оказаться неточными. Если таких проблемных выработок нет, то шаг моделирования целесообразно увеличить, так как это не приведёт к существенному искажению результатов.

Отображение расходов и скоростей воздуха

Все режимы отображения модельных расходов и скоростей воздуха при просмотре теплофизической модели будут показывать не результаты стационарного расчёта воздухораспределения, а расходы и скорости воздуха в выработках, вычисленные в ходе теплофизического моделирования для выбранного момента времени.

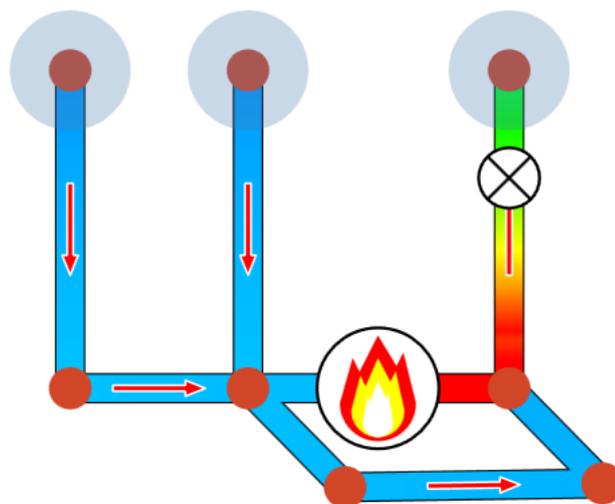


Кроме того, в окне, открывающемся по двойному щелчку на выработке, доступен график изменения расхода воздуха в выработке с течением времени.

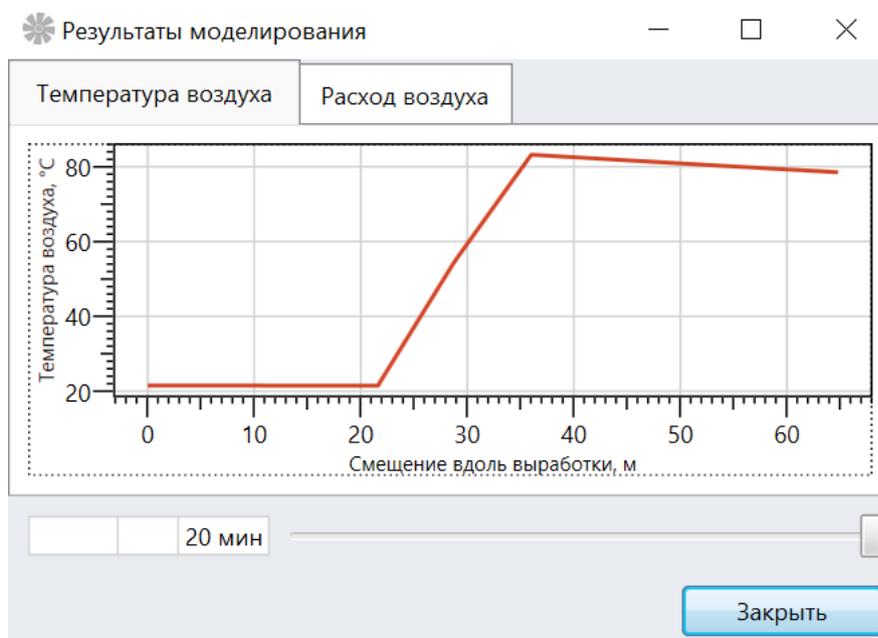


Отображение температуры воздуха

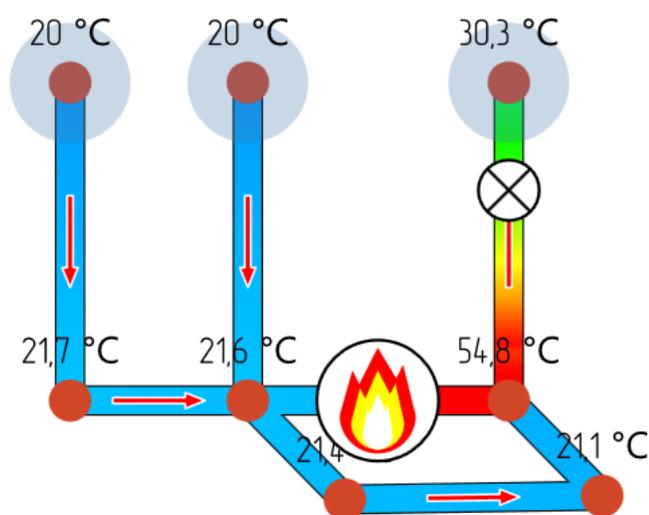
Что касается температуры воздуха, то общую картину её распределения можно получить, включив соответствующую закрашку выработок (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Температура воздуха*).



При этом каждый участок выработки отображается своим цветом, поэтому одна и та же выработка может закрашиваться множеством разных цветов в зависимости от распределения температуры внутри неё. Кроме того, график распределения температуры воздуха вдоль длины выработки для выбранного момента времени можно просмотреть в окне, открывающемся по двойному щелчку по выработке.



Точные значения температуры воздуха в узлах выработок можно отобразить при помощи соответствующего режима (*Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Конечные вершины (индикаторы) -> Температура воздуха*).



Отображение теплораспределения внутри породы

Если у какой-то выработки было указано, что температуру стенок у неё следует рассчитывать на основе модели нестационарного теплообмена с породой, то изменение теплораспределения внутри породы в таком случае можно просматривать на форме с результатами моделирования у соответствующей выработки.

Т стенок:

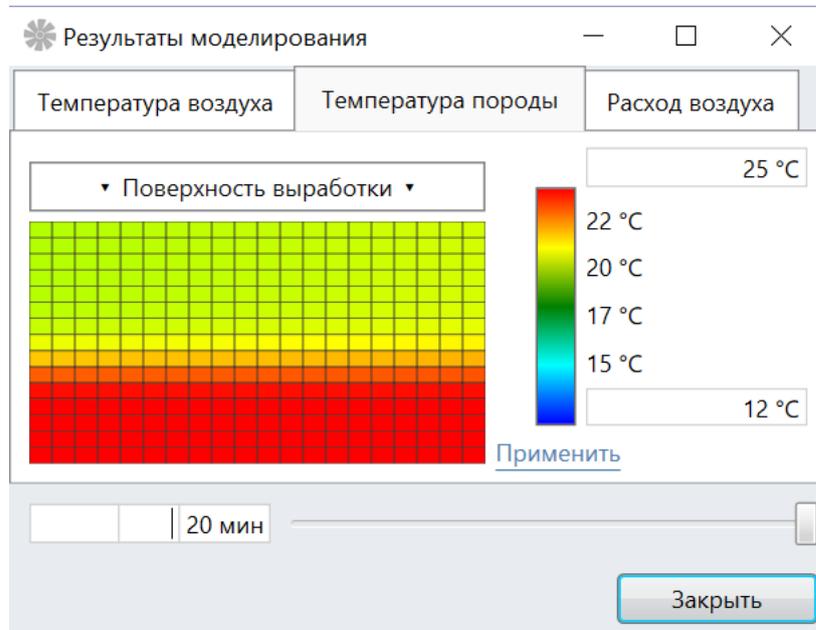
Модель:

Начать с:

[Просмотреть](#)

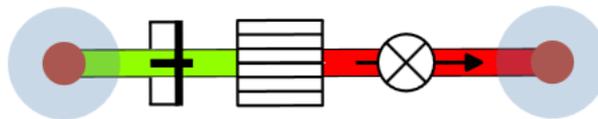
Тип модели: Динамическая

Сохранение: На каждой итерации

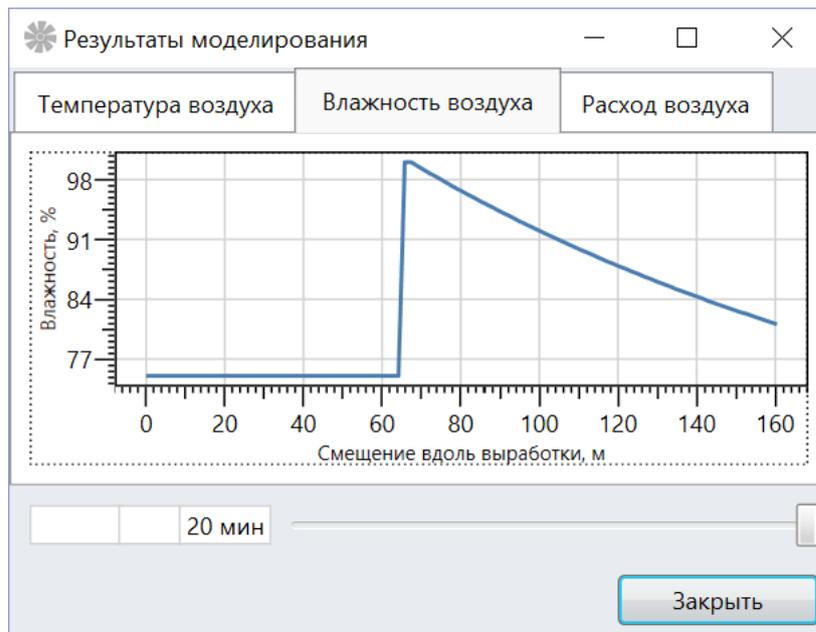


Отображение влажности и ощущаемой температуры

Если был включён учёт влажности воздуха, то соответствующее распределение на схеме может быть показано при помощи особого режима отображения (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Относительная влажность воздуха*). При этом подсвечивается именно относительная (а не абсолютная) влажность воздуха, которая вычисляется в том числе с учётом температуры воздуха.



Более подробно изменение влажности можно отслеживать на форме с результатами моделирования для конкретных выработок.



Кроме того, на основе температуры, влажности и скорости воздуха можно вычислить так называемую ощущаемую температуру воздуха при помощи следующей формулы.

$$T_a = T + 0.33 \cdot \frac{RH}{100} \cdot \frac{P_{saturated}(T)}{100} - 0.7 \cdot V - 4$$

T_a – ощущаемая температура воздуха

T – фактическая температура воздуха

RH – относительная влажность воздуха

$P_{saturated}$ – давление насыщенного водяного пара при данной температуре

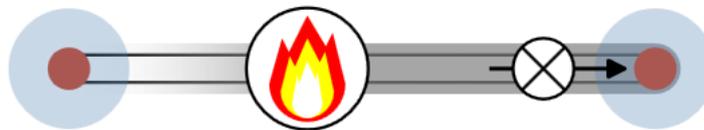
V – скорость воздуха в выработке

Таким образом, если при теплофизическом моделировании был включён учёт влажности воздуха, то помимо фактической на схеме можно отобразить и значение ощущаемой температуры (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Ощущаемая температура воздуха*). Кроме того, обе эти температуры будут отображаться на одном графике в окне с результатами моделирования для конкретной выработки.



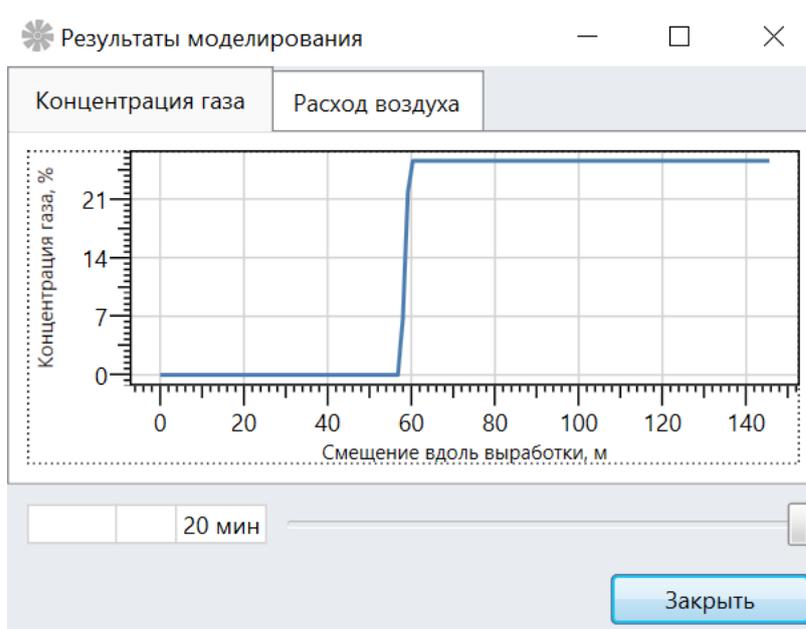
Просмотр концентрации газа и задымления

Иногда важно отслеживать сам факт наличия ненулевой концентрации газа в выработках на схеме. В таких случаях целесообразно включить отображение задымления на схеме (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Задымление*).



Если же важно знать точное значение концентрации газа, то можно либо включить соответствующий режим на схеме (*Теплофизика -> Режимы отображения -> Концентрация газа*), либо просмотреть концентрацию на форме с результатами моделирования для выработки.





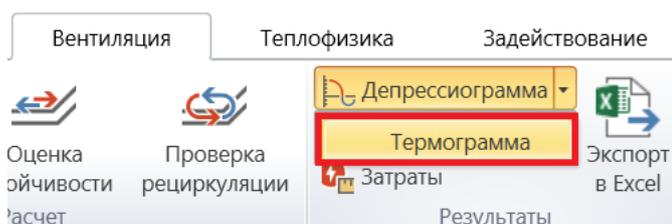
Сохранение температуры воздуха

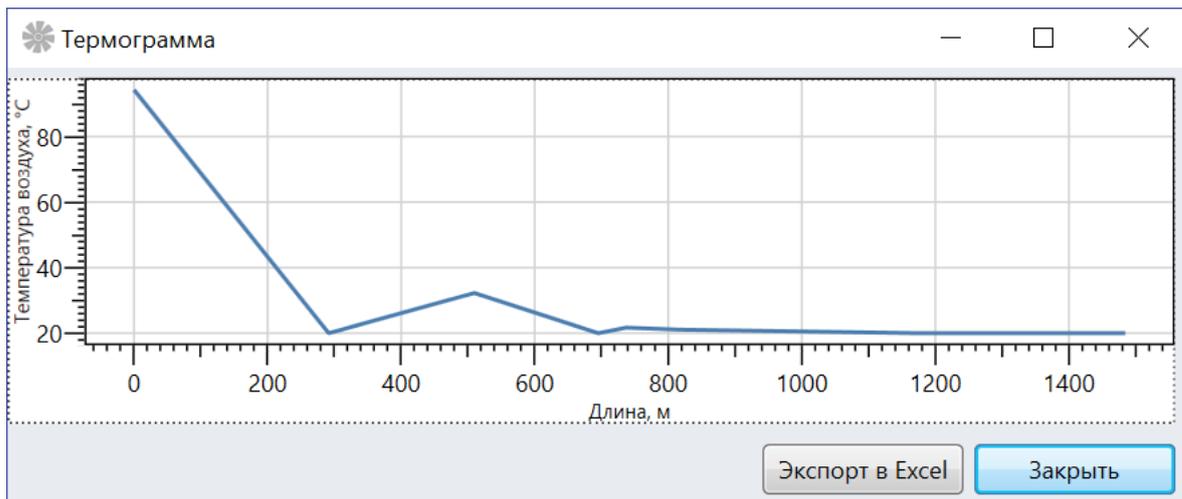
Стационарный расчёт воздухораспределения использует температуру воздуха в узлах выработок для моделирования естественной тяги. Однако задать температуру воздуха в каждом из узлов вручную представляется затруднительным. Одним из способов сделать это автоматически является использование команды *Сохранить температуру воздуха* в момент просмотра одной из теплофизических моделей.



В этом случае температура воздуха в каждом узле будет задана на основе вычисленной температуры воздуха в этом месте для текущего модельного времени.

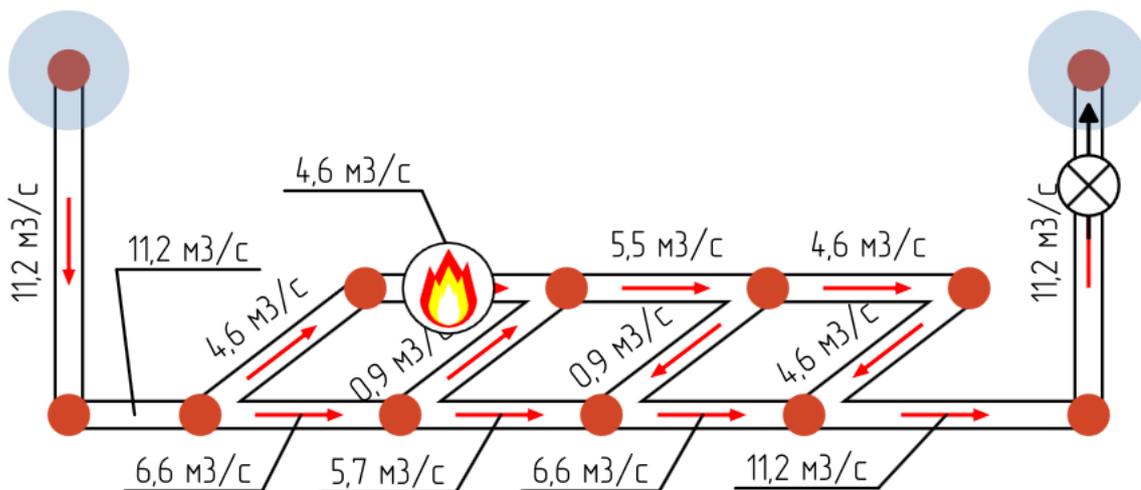
Позднее по температуре воздуха в узлах можно строить термограммы при помощи команды на вкладке *Вентиляция*.



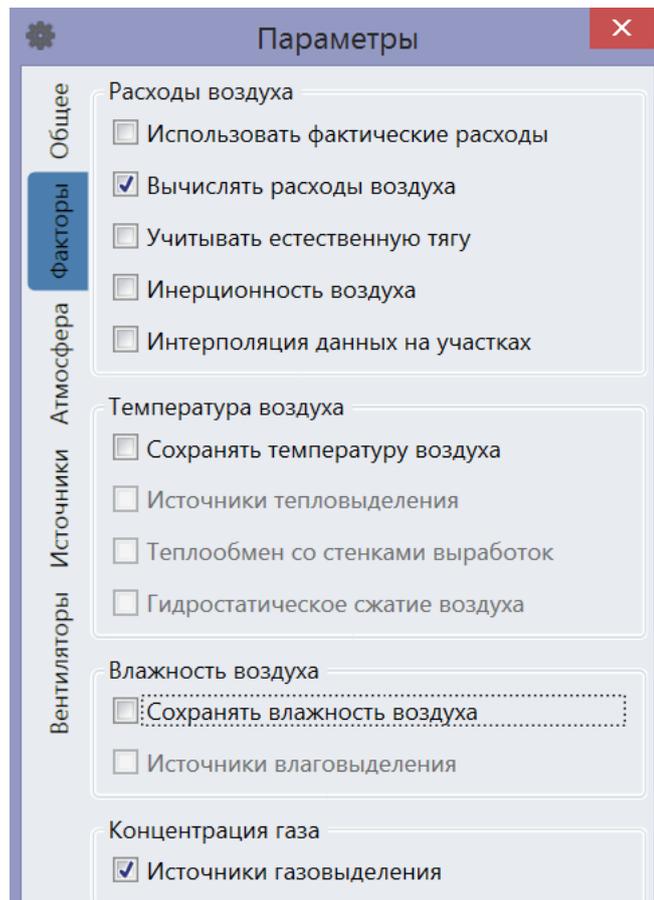


Прогноз задымления в случае реверса вентилятора

Рассмотрим простейший пример использования теплофизического моделирования для прогнозирования распространения дыма от пожара при реверсе вентилятора на 10 минуте после возгорания. Пусть сеть выработок имеет следующую топологию.



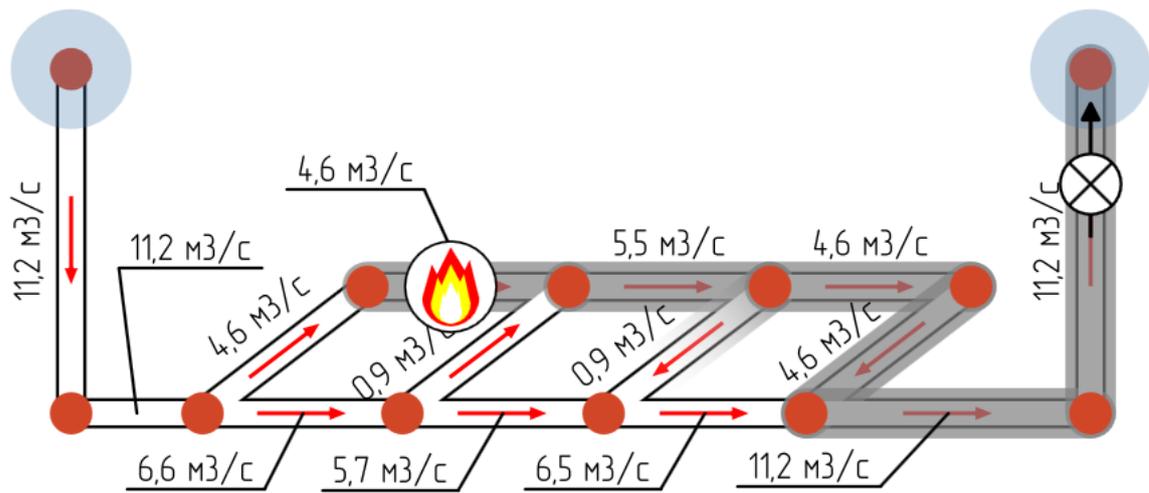
Создадим теплофизическую модель с конечным временем 20 минут и укажем, что отслеживать требуется только концентрацию газа от пожара.



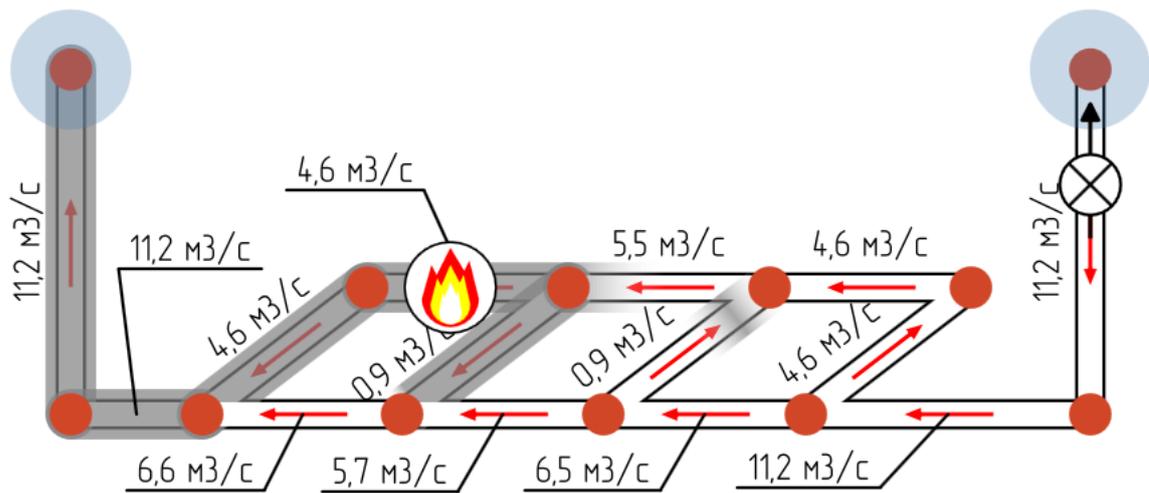
После этого настроим расписание работы вентилятора так, чтобы его напор изменил свой знак в период времени с 9 по 11 минуту.



После рассчитаем модель и включим отображение задымления. В результате через 9 минут после возгорания дым распространится следующим образом.

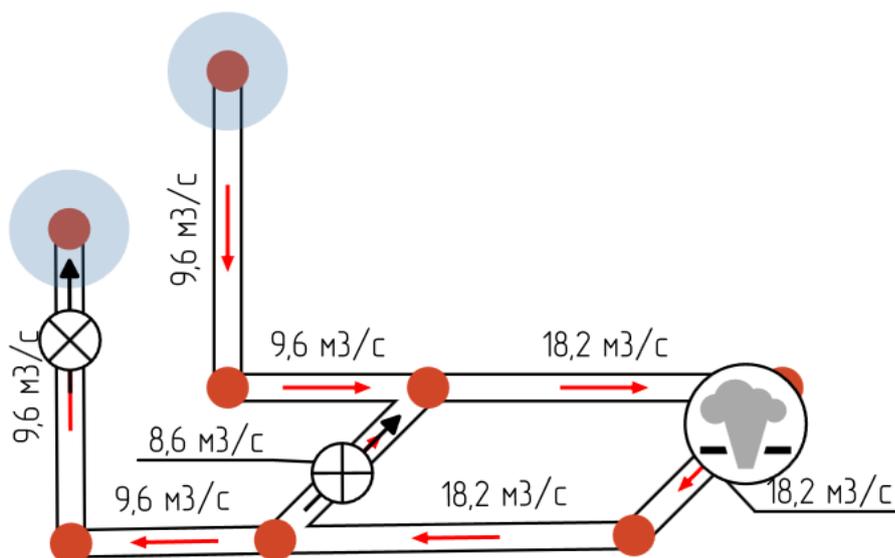


Затем вентилятор начнёт реверсироваться, и к 20 минуте картина задымления существенно изменится.

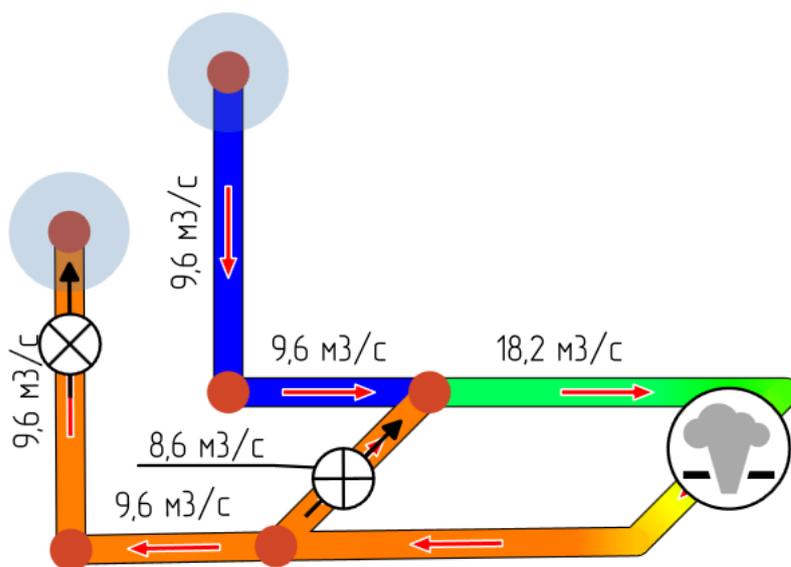


Расчёт концентрации газа в случае рециркуляции воздуха

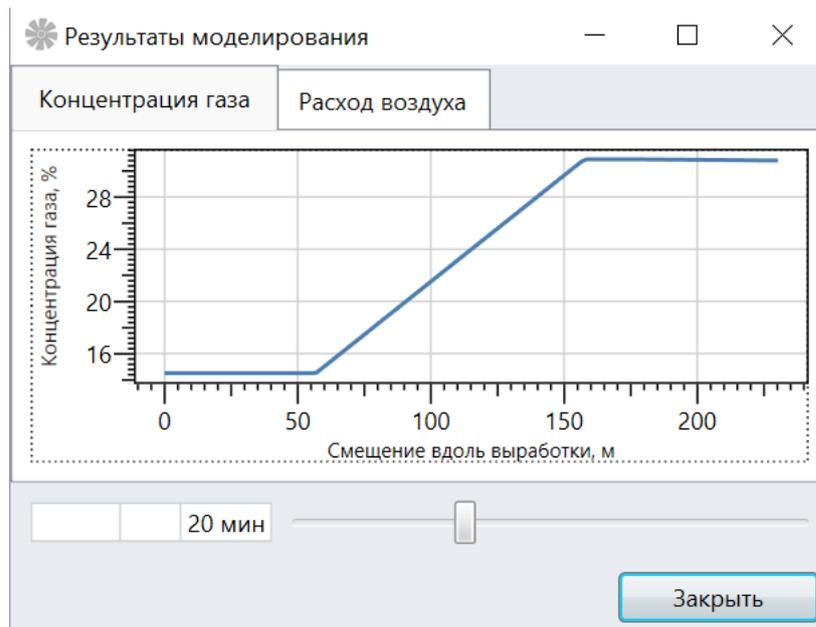
Пусть теперь необходимо рассчитать, какова будет концентрация газа, выделяющегося в забое с известной интенсивностью, в случае рециркуляционной схемы проветривания. При этом сеть выработок имеет следующую топологию.



Для этого создадим теплофизическую модель, указав, что учитывать нужно только концентрацию газа. После этого выставим конечное время равным 60 минутам, чтобы дать картине распределения газа стабилизироваться, и включим режим отображения концентрация газа.

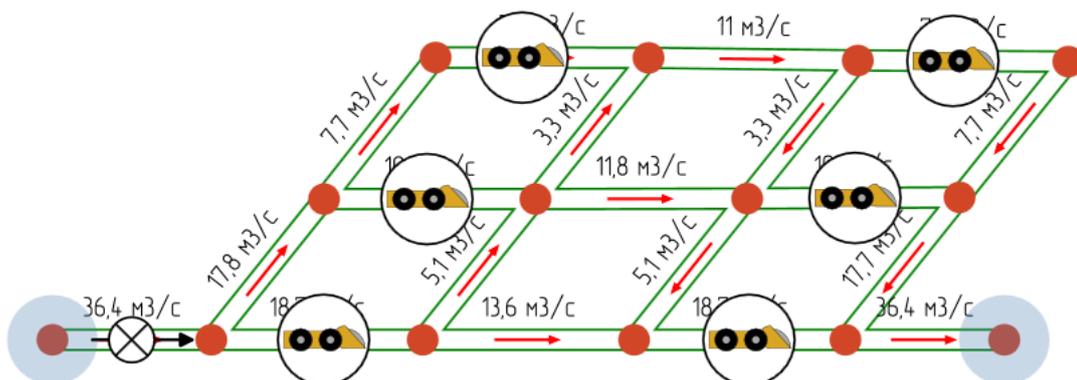


Точное значение концентрации можно увидеть в окне результатов моделирования для крайней правой выработки.

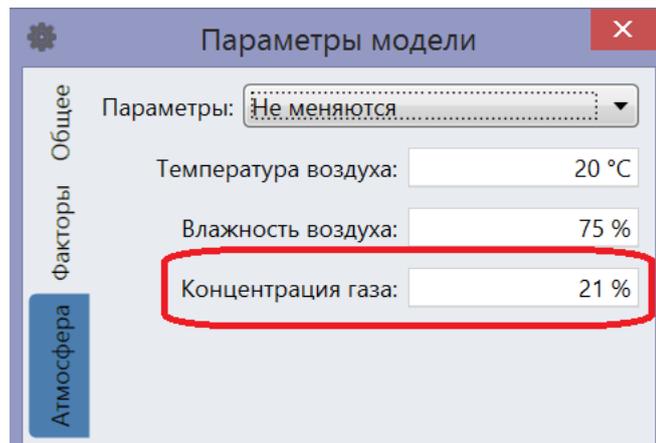


Расчёт потребления кислорода двигателями внутреннего сгорания

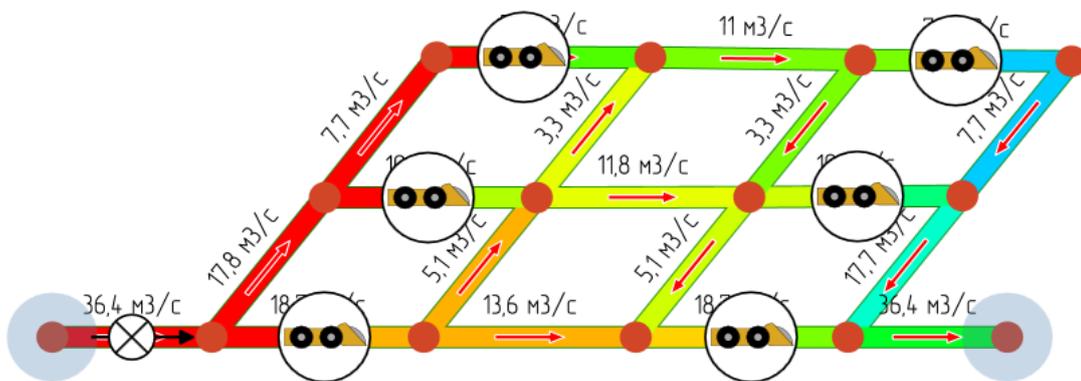
Современные правила безопасности требуют, чтобы рудничная вентиляция проектировалась так, чтобы концентрация кислорода гарантированно не опускалась ниже определённого минимального значения. Основным же фактором потребления кислорода в шахте считается работа двигателей внутреннего сгорания. В связи с этим рассмотрим пример теплофизической модели, в которой проектирование вентиляции будет вестись с учётом потребления кислорода двигателями внутреннего сгорания. Сеть выработок при этом имеет следующую топологию.



Воздухораспределение в выработках задано путём указания расхода на входящей струе и автоматического распределения всех остальных расходов. Кроме того, на схеме расставлены двигатели внутреннего сгорания, имеющие параметры по умолчанию. При этом в свойствах теплофизической модели указано, что расчёт требуется выполнять только для концентрации газа в выработках (в данном случае кислорода). При этом указана начальная концентрация газа в атмосфере, которая задана равной 21 проценту.



В этом случае картина изменения концентрации кислорода будет выглядеть следующим образом (считая, что красный цвет соответствует концентрации в 21 процент, а синий – в 19 процентов).



Обработка данных температурной съёмки

В случае построения теплофизической модели на основе фактических замеров необходимо задать температуру воздуха в каждом из узлов на схеме; расход, для которого указана эта температура; а также температуру нетронутой породы рядом с каждой из выработок. Что касается температуры нетронутой породы, то её можно оценить на основе высотных отметок конечных узлов выработки. Дело в том, что температура породы чаще всего увеличивается равномерно с увеличением глубины. Поэтому, зная температуру и высотную отметку нейтрального слоя, то есть слоя, начиная с которого температура меняется равномерно, можно вычислить температуру нетронутой породы для высотной отметки H при помощи следующей формулы.

$$T_H = T_0 + \frac{H_0 - H}{\Delta T_{step}}$$

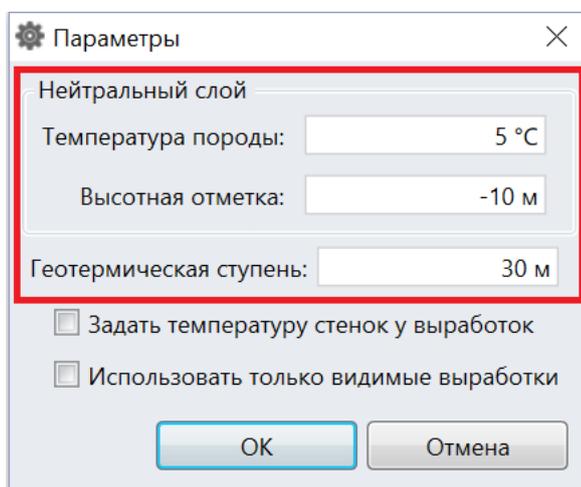
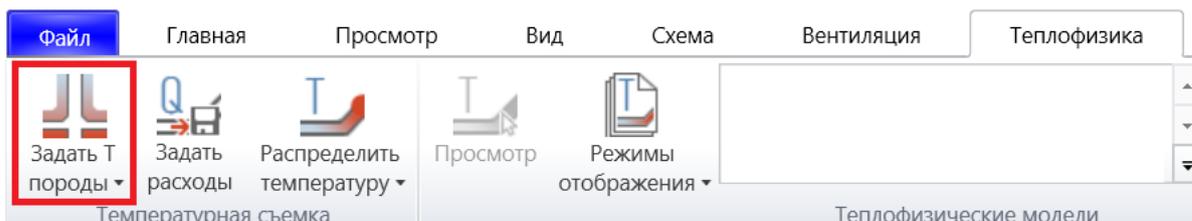
T_H – температура нетронутой породы для высотной отметки H

T_0 – температура нетронутой породы у нейтрального слоя

H_0 – высотная отметка нейтрального слоя

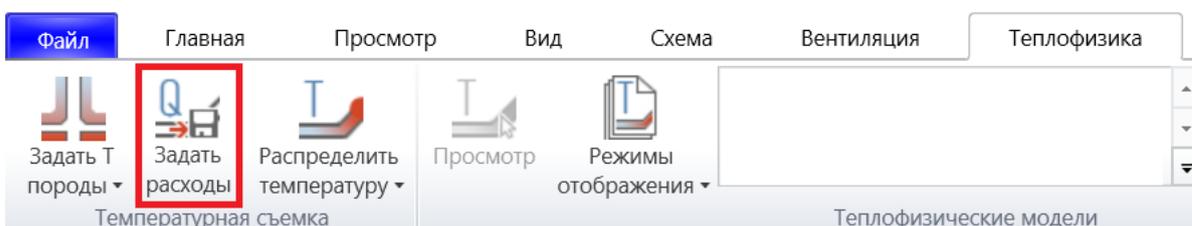
ΔT_{step} – геотермическая ступень, то есть перепад высоты, связанный с изменением температуры нетронутой породы на один градус Цельсия

Таким образом, если у всех узлов на схеме заданы высотные отметки, и параметры нейтрального слоя указаны верно, то температуру нетронутой породы рядом с выработками можно задать автоматически при помощи кнопки *Задать T породы* на вкладке *Теплофизика*.

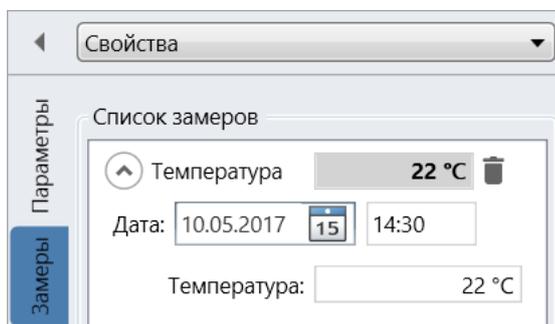


Однако температура нетронутой породы указывается в свойствах выработки, поэтому в этом случае берётся среднее значение температуры породы у её конечных узлов. Кроме того, при помощи опции *Задать температуру стенок у выработок* можно указать, что стенки выработок должны получить температуру, равную температуре нетронутой породы.

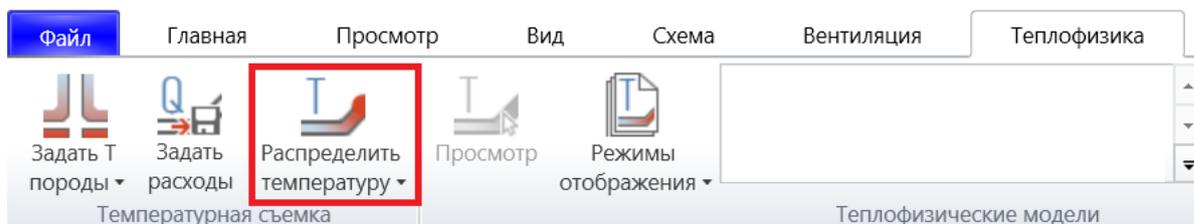
Что касается расходов воздуха, для которых будет задаваться температура воздуха в узлах, то их можно скопировать из текущих модельных расходов в выработках (кнопка *Задать расходы* на вкладке *Теплофизика*), которые могут быть предварительно вычислены при помощи алгоритма распределения расходов.



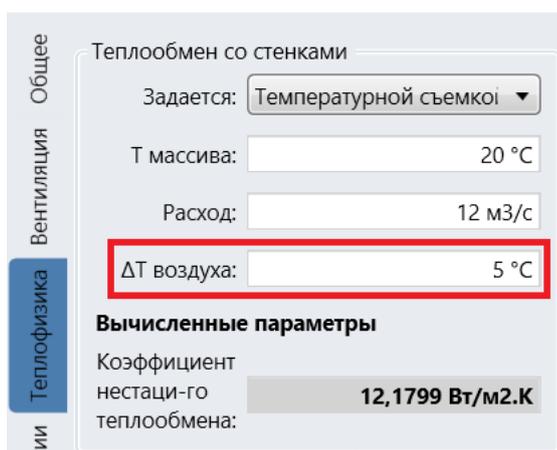
Замеренные значения температуры воздуха в узлах задаются в поле *Факт. T воздуха* и могут быть отображены на схеме при помощи соответствующего индикатора (*Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Конечные вершины (индикаторы) -> Фактическая температура воздуха*).



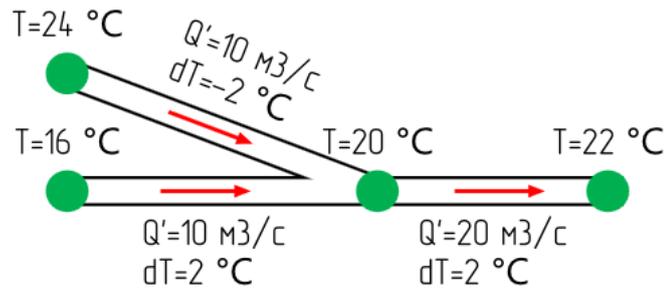
Во всех остальных узлах, где значение температуры воздуха измерить не удалось, эти значения можно вычислить при помощи алгоритма распределения температуры (кнопка *Распределить температура* на вкладке *Теплофизика*).



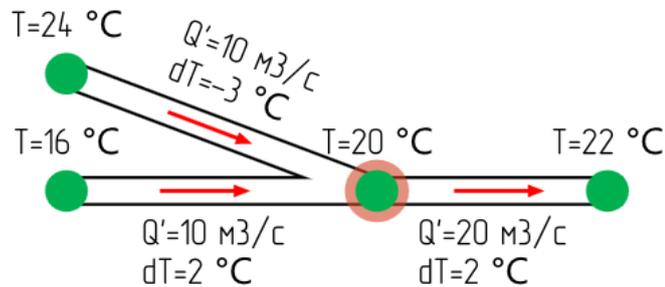
При этом алгоритм подбирает не только температуру воздуха в узлах, но и перепад температуры в каждой из выработок так, чтобы после перемешивания потоков, получились соответствующие значения в узлах.



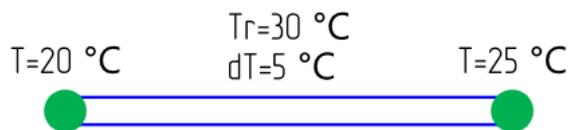
Проверить, что перепады температур в выработках не противоречат температуре воздуха в узлах можно при помощи специального режима отображения (*Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Конечные вершины -> Неверная температура воздуха*). Рассмотрим следующий пример сети.



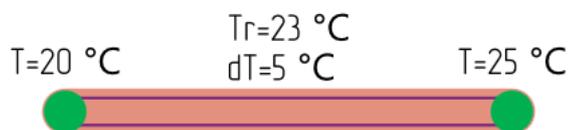
В среднем узле перемешиваются два потока воздуха. В первом из них температура воздуха падает с 24 до 22 градусов, а во втором – возрастает с 16 до 18 градусов. В результате после перемешивания получается температура 20 градусов в узле. Но стоит, например, указать, что перепад температуры в первом потоке составляет не 2, а 3 градуса, как средний узел тут же подсветится красным.



Важно также, чтобы перепад температуры воздуха в выработке был увязан с температурой нетронутой породы. Если, к примеру, воздух в выработке нагревается, то он не может нагреться выше температуры породы, а если охлаждается, то не может охладиться ниже этого значения. Проверить это можно при помощи соответствующего режима отображения (*Вид -> Теплофизика -> Исходные данные -> Выработки -> Неверное приращение T воздуха*). Рассмотрим следующий пример.

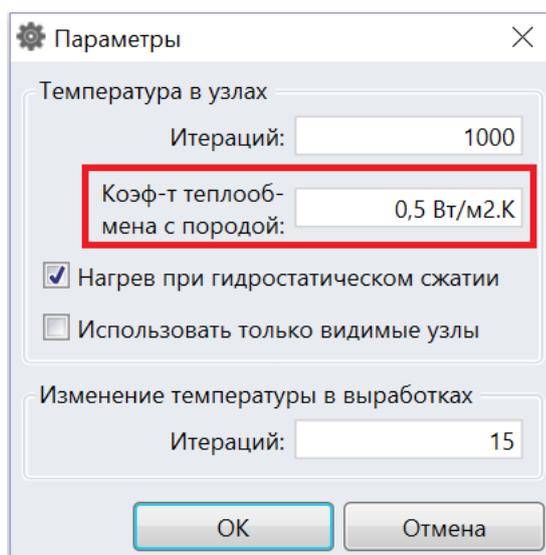


Воздух в данной выработке нагревается на 5 градусов с 20 до 25 градусов, а температура нетронутой породы составляет 30 градусов. Если же температура породы составляет лишь 23 градуса, то эта выработка будет подсвечена красным.



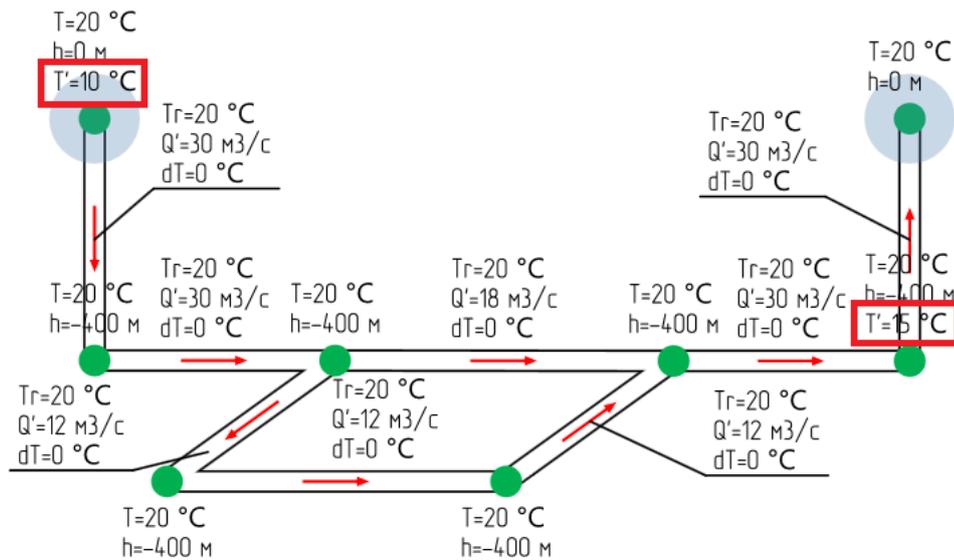
Что касается самого алгоритма распределения температуры, то его задача состоит в том, чтобы сохранить замеренную в узлах температуру и задать температуру в оставшихся узлах и перепады температуры в выработках таким образом, чтобы удовлетворить вышеприведённым проверкам, а также учесть то, что на некоторых участках температура меняется сильнее, а на некоторых слабее. По аналогии с давлением воздуха температура в выработке меняется тем сильнее, чем больше её температурное сопротивление.

Температурное сопротивление выработок оценивается при помощи приведённой ранее формулы для вычисления перепада температуры воздуха на основе коэффициента нестационарного теплообмена, который, в свою очередь, берётся из настроек алгоритма.

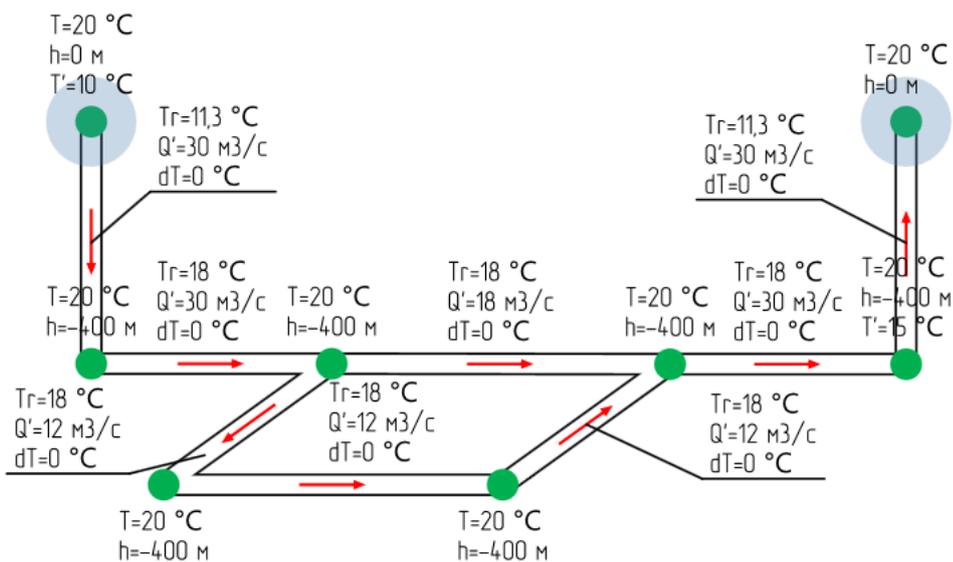


Конкретное значение данного коэффициента не так важно (но лучше выбирать его достаточно малым), важны соотношения температурных сопротивлений выработок. Кроме того, на перепад температуры в наклонной выработке значительное влияние оказывает гидростатическое сжатие, учёт которого можно включить в настройках алгоритма.

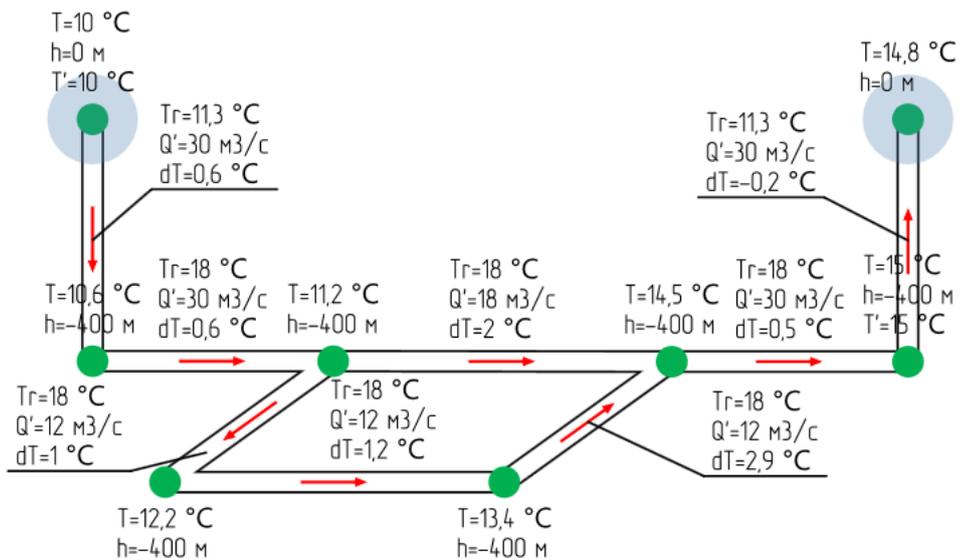
Рассмотрим следующий пример сети, на которой указаны расходы воздуха в выработках, высотные отметки конечных узлов, а также замеренная температура воздуха на входе (индикатор T'), равная 10 градусам, и на выходе, равная 15 градусам.



Далее назначим температуру нетронутой породы в выработках (индикатор T_r) на основе высотных отметок конечных узлов.



А затем распределим температуру без учёта гидростатического сжатия. В итоге окажется, что температура воздуха в стволах почти не изменяется.



Но если включить учёт гидростатического сжатия, то картина станет обратной: наибольший перепад температуры будет именно в стволах.

