

# ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ

## Назначение двигателя

Двигатель предназначен для использования в качестве привода нагнетателя на линейных компрессорных станциях природного газа.

Двигатель выполнен трехвальным со свободной турбиной.

Мощность – 16 МВт.

Основные части: компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), камера сгорания (КС), турбина высокого давления (КВД), турбина низкого давления (КНД), силовая турбина (ТС), выходное устройство.

Частоты вращения валов: высокого давления – 12000 об/мин, среднего давления – 9500, низкого давления – 7800 об/мин.

Топливо – природный газ.

Температура газа за камерой сгорания – 1450 К.

## Анализ вредных и опасных производственных факторов на этапе эксплуатации

При эксплуатации двигателя к вредным и опасным факторам относятся:

- Повышенный уровень шума на рабочем месте, вызванный всасыванием воздуха, колебанием газа в элементах проточной части, колебанием элементов конструкции из-за вращения ротора, истечения реактивной струи из выходного устройства.
- Загрязнение воздуха в области, прилегающей к компрессорной станции,

продуктам сгорания топлива, содержащими оксиды азота, углерода, сажу; парами масла из системы смазки (Таблица 5.1).

- Повышенный уровень вибраций из-за дисбаланса вращающихся масс (Таблица 5.1).
- Повышенный уровень температуры в рабочей зоне вследствие нагрева корпуса двигателя (Таблица 5.1).
- Повышенный уровень температур поверхностей оборудования и поверхностей проточной части: в компрессоре за счет сжатия воздуха, в турбине – за счет температуры горячего газа (Таблица 5.1).

Анализ перечисленных факторов представлен в таблице 5.1 с указанием нормативного документа и нормативных значений рассмотренных производственных факторов.

<b>Вредные и опасные производственные факторы ГОСТ 12.2.003-74, Р2.2.2006-05</b>	<b>Источник производственного фактора</b>	<b>Нормативное значение</b>	<b>Нормативный документ</b>
Повышенный уровень шума на рабочем месте	Вентилятор, Компрессор, Турбина, Выходное устройство	Таблица 2, строка 4 – для рабочих мест за пультами регулирования параметров установки	СН 2.2.4/2.1.8.562-96

Вредные и опасные производственные факторы ГОСТ 12.2.003-74, Р2.2.2006-05	Источник производственного фактора	Нормативное значение	Нормативный документ
Повышенный уровень продуктов сгорания в воздухе рабочей среды	Камера сгорания	Максимальные разовые ПДК: $CO_2$ (2 мг/м <sup>3</sup> ), $CO$ (5 мг/м <sup>3</sup> ), $NO_2$ (10 мг/м <sup>3</sup> ), $NO$ (20 мг/м <sup>3</sup> ),	ГН2.2.5.3532-18 (таблица 1) "Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны"
Повышенный уровень вибрации	Ротор низкого давления; Ротор среднего давления; Ротор высокого давления	Указано в таблице 3 (для технологических вибраций, воздействующих на человека на рабочих местах стационарных машин или передающих на рабочие места, не имеющие источников вибрации)	СН 2.2.4/2.1.8.566-96(таблица 6) "Производственная вибрация. Вибрации в жилых и общественных зданиях"

<b>Вредные и опасные производственные факторы ГОСТ 12.2.003-74, Р2.2.2006-05</b>	<b>Источник производственного фактора</b>	<b>Нормативное значение</b>	<b>Нормативный документ</b>
Микроклимат	Камера сгорания	Производственное помещение Категория работ- IIa (175-232Вт) Температура воздуха 20-22 °С, Температура поверхностей 19-23 °С, Относительная влажность 60-40 %, Скорость движения воздуха 0,2 м/с	СП 60.13330.2016 "Отопление, вентиляция и кондиционирование"
Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов	Корпус турбин; Корпусы камеры сгорания; Корпус выходного устройства	51 °С (1 мин)	СанПиН 2.2.3.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

Таблица 1: Анализ вредных и опасных производственных факторов

## Анализ уровня шума на станции

Расчет производился в программном комплексе АРМ «Акустика».

Расчет был произведен для машинного отделения и двух прилегающих комнат – комнаты управления и электротехнического отсека. Схема расчетной области представлена на рис. 5.1.

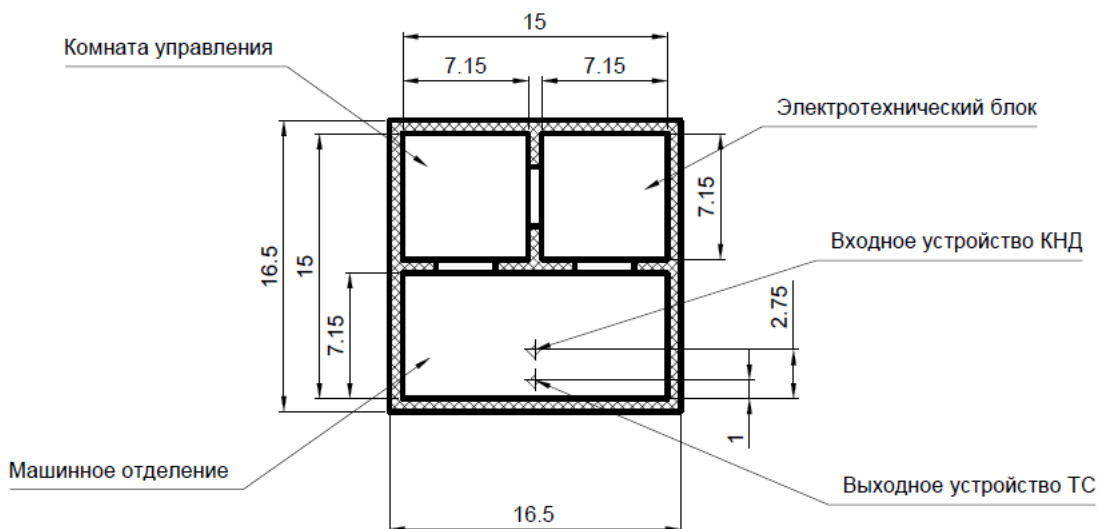


Рис. 1: Схема расчетной области (КНД – компрессор низкого давления, ТС – силовая турбина)

Соответствующая модель, построенная в программном комплексе АРМ «Акустика» приведен на рис. 5.2.

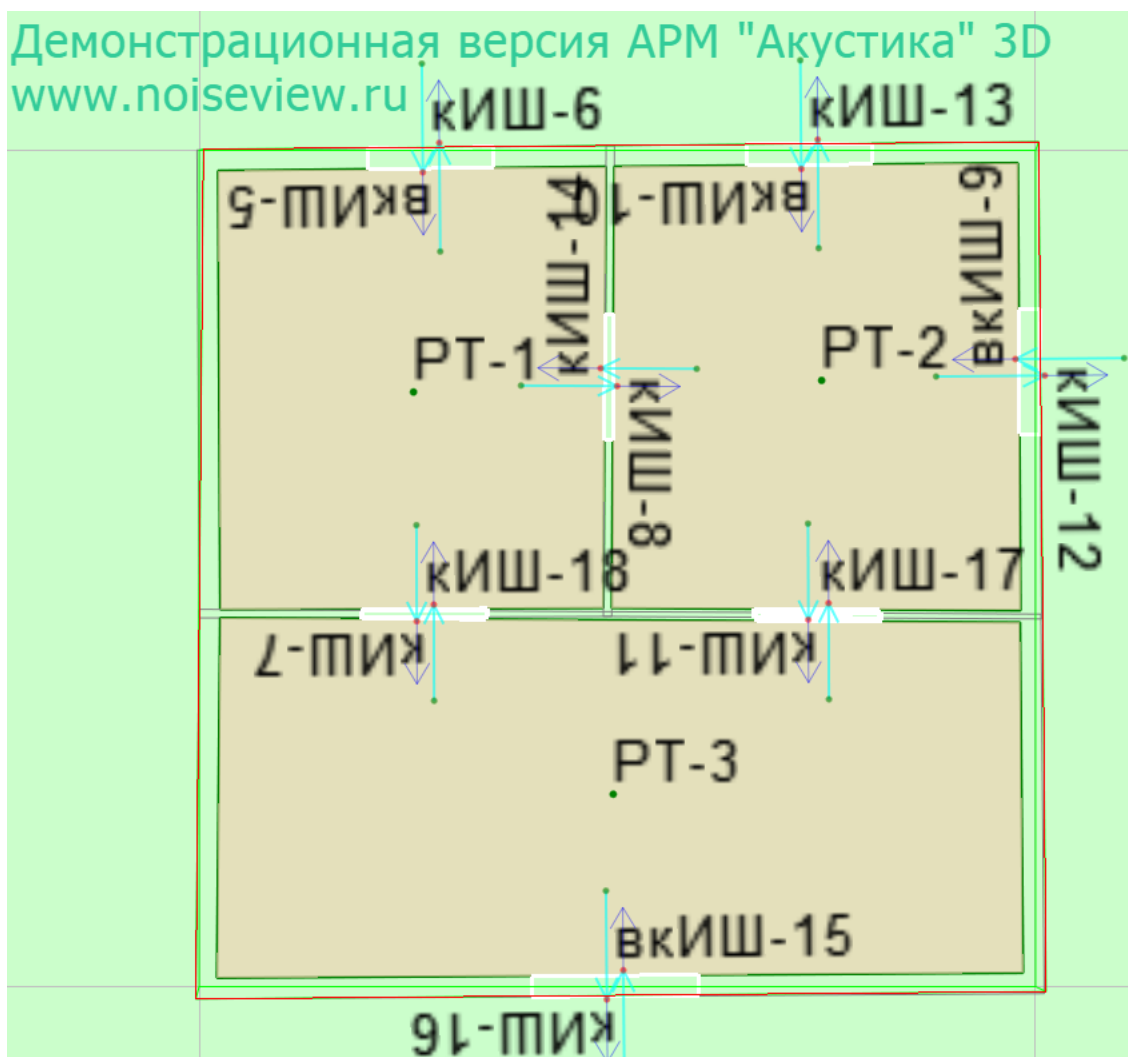


Рис. 2: Расчетная модель, построенная в программном комплексе АРМ "Акустика"

Для расчета уровней шума использованы шумовые характеристики вентилятора и выходного устройства двигателя НК38-СТ, идентичные разрабатываемому двигателю. Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц представлены в таблице 5.2.

Источник	Частота, Гц						
	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Вентилятор	104	102	103	97	97	94	95

Выходное устройство	119	117	121	116	114	110	115
---------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Таблица 2: Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическим частотами Гц

Изолинии звукового давления, полученные в результате расчета показаны на рис. 5.3.

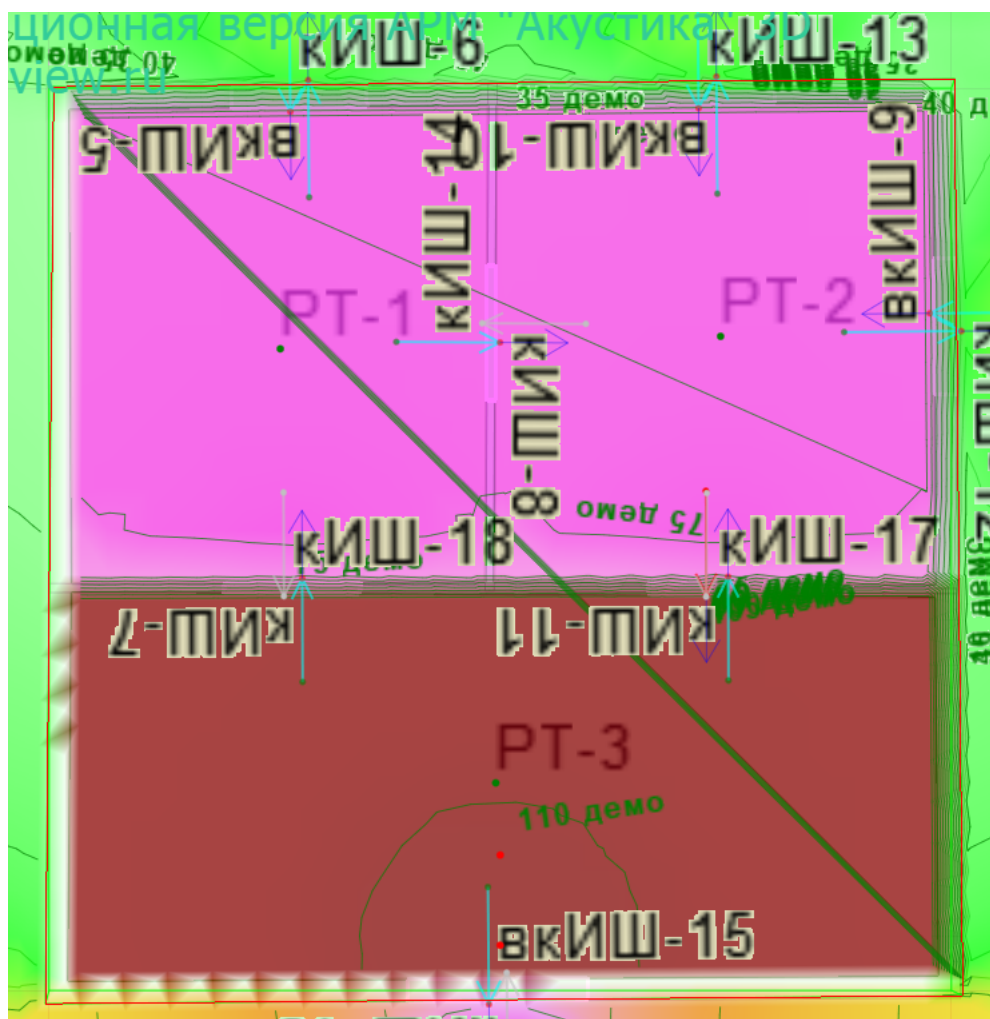


Рис. 3: Изолинии звукового давления

Сравнение уровней звукового давления в расчетной точке, находящейся в комнате управления с нормативным (согласно СН 2.2.4/2.1.8.562- 96 таблица 2, строка 4) представлено в таблице 5.3.

Частота, Гц							
Источник	31,5	63	125	250	500	1000	2000
Норматив	103	91	83	77	73	70	68
Расчетная точка	83	81,5	77,3	70,1	63,8	56,4	62,5

Таблица 3: Сравнение полученных уровней звукового давления с нормативным

Из полученных данных следует, что уровень шума на рабочем месте, не превышает нормативного ни в одном из частотных диапазонов.

## Оценка размера зоны распространения облака горючих газов и паров при аварии

Оценка размера зоны распространения облака горючих газов заключается в определении зоны с концентрацией горючего вещества выше нижнего концентрационного предела воспламенения (НКПВ). Для природного газа эта величина равна 29 мг/л. Исходные данные для проведения расчета приведены в таблице 5.4.

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Температура кипения природного газа	$T_k$	К	113
Теплоемкость природного газа	$C_{pg}$	Дж/(кг · К)	3074
Теплоемкость воздуха	$C_{pg}$	Дж/(кг · К)	1006



Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Газовая постоянная воздуха	$R_v$	Дж/(кг · К)	287
Газовая постоянная природного газа	$R_B$	Дж/(кг · К)	519,6
Атмосферное давление	$p_a$	Па	$1,013 \cdot 10^5$
Атмосферная температура	$T_a$	К	288
Теплота парообразования природного газа	$L_T$	Дж/кг	$510 \cdot 10^3$
Теплота парообразования водяных паров	$L_B$	Дж/кг	$2256 \cdot 10^3$
Температура подстилающей поверхности	$T_{пов}$	К	300
Относительная влажность	$\psi$	%	50
Массовая доля водяных паров	$X$	-	$9,35 \cdot 10^{-3}$
Температура газа в трубопроводе	$T_T$	К	275

Величина	Обозначение	Размерность	Значение
Диаметр трубопровода	$D$	м	1,2
Длина участка трубопровода между отсечными клапанами	$L$	м	6
Давление газа в трубопроводе	$p_{\Gamma}$	Па	$5,6 \cdot 10^6$

Таблица 4: Исходные данные для проведения оценки зоны распространения облака горючих газов и паров при аварии

Определим массу газа между отсечными клапанами  $m_{\Gamma}$ , кг:

$$m_{\Gamma} = \frac{p_{\Gamma}}{R_{\Gamma} T_{\Gamma}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 L = \frac{5,4 \cdot 10^6}{519,6 \cdot 275} \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 1,2^2 \cdot 6 = 265,8 \text{ кг.}$$

Определим массу воздуха, мгновенно вовлекающуюся в облако углеводородов, кг:

$$m_{\text{в}} = \frac{(1 - \delta) \cdot m_{\Gamma} \cdot L_{\Gamma}}{C_{\text{пв}} \cdot (T_{\text{в}} - T_{\Gamma}) + X L_{\text{в}}},$$

где

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_{\text{пг}}(T_{\text{в}} - T_{\text{к}})}{L_{\Gamma}}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{1006 \cdot (288 - 133)}{510 \cdot 10^3}\right) = 0,65,$$

таким образом,

$$m_{\text{в}} = \frac{(1 - 0,65) \cdot 265,8 \cdot 510 \cdot 10^3}{1006 \cdot (288 - 133) + 9,35 \cdot 10^{-3} \cdot 2256 \cdot 10^3 \text{ кг.}},$$

Принимается, что образовавшееся облако дрейфует по ветру со скоростью  $w_0 = 0,6w$ , где  $w$  – скорость ветра, и имеет в начальный момент форму

цилиндра, высота которого равна его радиусу. С течением времени высота облака уменьшается, а радиус растёт.

Скорость ветра зависит от класса устойчивости по Паскуиллу. В данном расчете принимается класс по Паскуиллу В, что соответствует наиболее опасному случаю – наибольшему распространению углеводородного облака. Соответствующая этому классу устойчивости скорость ветра  $w = 2$  м/с. Изменение во времени радиуса, высоты облака и концентрации газа в нем в начальной фазе (фаза падения) определяется путем решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_B}{dt} = \rho_B \pi r^2 a_2 a_3 w Ri^{-1} + 2\rho_B a_1 \frac{dr}{dt} \pi r h \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\frac{dm_B}{dt} C_{pB}(T_B - T) + \pi r^2 \cdot (T_{пов} - T)^{1,333}}{m_B C_{pB} + m_{\Gamma} C_{p\Gamma}} \\ \frac{dr}{dt} = a_4 \left( \frac{dh \cdot (\rho_{\Gamma.В.} - \rho_B)}{\rho_{\Gamma.В.}} \right)^{0,5} \end{cases}$$

где  $m_B$ , кг – масса воздуха в облаке,  $\rho_B$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха,  $r$ , м – радиус облака,  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – коэффициенты ( $a_1 = 0,7$ ,  $a_2 = 0,5$ ,  $a_3 = 1,07$ ,  $a_4 = 0,3$ ),  $g$ , м/с – ускорение свободного падения;

$Ri$  – число Ричардсона, определяемое из соотношения:

$$Ri = \frac{\left( \frac{5,88 h^{0,48} g}{a_3^2 w^2} \right)^{0,5} (\rho_{\Gamma.В.} - \rho_B)}{\rho_B};$$

$h$ , м – высота облака,  $T$ , К – температура облака,  $\rho_{\Gamma.В.}$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность паровоздушного воздуха. Для решения системы уравнений необходимо дополнительное соотношение:

$$\rho_{\Gamma.В.} = \frac{m_B + m_{\Gamma}}{(m_B + m_{\Gamma}) \left( \frac{T_B}{T} \right)}.$$

В качестве критерия окончания фазы падения принимается выполнение условия

$$\frac{\rho_{\Gamma.В.} - \rho_B}{\rho_{\Gamma.В.}} < 10^{-3}.$$

Зависимость  $h = h(t)$  определяется из соотношения:

$$h(t) = (m_{\text{в}} + m_{\text{г}}) \left( \frac{T_{\text{в}}}{T} \right) \frac{1}{\pi r(t)^2}$$

Концентрация газа в точке с координатами определяется по формуле:

$$C(x, y, z) = \frac{2m_{\text{г}}}{(2\pi)^{1,5} \cdot \sigma_y^2 \cdot \sigma_z^2} \cdot \exp \left( -\frac{(x - x_0)^2 + y^2}{2\sigma_y^2} \right) \cdot \exp \left( -\frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right)$$

где  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – среднеквадратичные отклонения, зависящие от величины  $x_c - x_0$ ;  $x_c$ , м – координата центра облака в направлении ветра;  $x_0$ , м – координата точки окончания фазы падения.

При  $x_c = x_0$  принимается  $\sigma_{y0} = r/2, 14$ ,  $\sigma_{z0} = h/2, 14$ ;

при  $x_c \neq x_0$   $\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + \sigma_y(x_c - x_0)$ ,  $\sigma_z^2 = \sigma_{z0}^2 + \sigma_z(x_c - x_0)$ .

Результатом расчета является пространственное распределение концентраций углеводородного облака. Срез такого распределения на уровне земли ( $z = 0$ ) представлен на рис. 5.4.

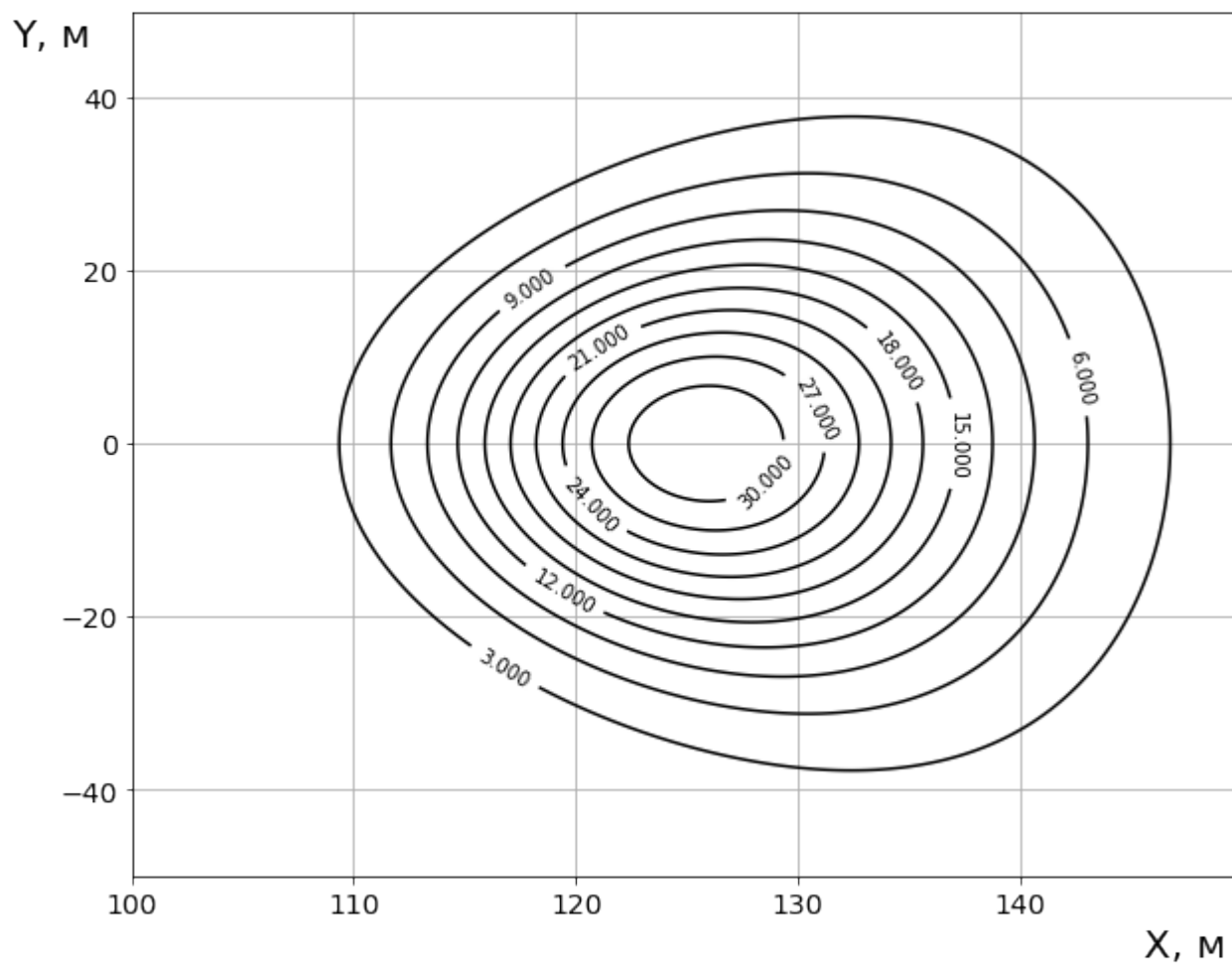


Рис. 4: Срез распределения концентраций на момент окончания фазы падения

Из полученного решения видно, что зона воспламенения по мере движения облака распространяется вплоть до расстояния 130 м по направлению ветра. Следовательно, открытый огонь недопустим в радиусе 130 м от станции.

## Список литературы

1. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Хвацкий К.К. Длительная прочность никелевых сплавов для монокристаллических лопаток газотурбинных установок // Журнал «Конверсия в машиностроении». - 2005. - №3.
2. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / Иванов В. Л., Леонтьев А. И., Манушин Э. А., Осипов М. И. ; ред. Леонтьев А. И. - 2-е изд., стер. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. - 591 с. : ил. - Библиогр.: с. 576-577. - ISBN 5-7038-2138-X.
3. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок: учебник для вузов / Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.