

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ПОЛИГОНА ТКО

С. П. Вострецов, АО «ВНИИ Галургии», Пермь

В статье излагается способ расчета системы вертикального газового дренажа полигона. Рассматриваются три случая: удаление биогаза в пассивном режиме через систему равномерно расположенных дренажных скважин при наличии непроницаемого изолирующего покрытия поверхности полигона; то же с учетом реальной проницаемости изолирующего покрытия; удаление биогаза в активном режиме с созданием разрежения в скважинах с помощью вентиляторной установки газосборной системы. Дается оценка эффективности дегазации.

Вследствие разложения органического вещества отходов на полигоне ТКО образуется биогаз, состоящий на 50–60 % из метана. В эксплуатационный период удаление биогаза из тела полигона происходит самопроизвольно через поры свалочного грунта и распределено на значительной площади. По окончании приемки отходов на сформированной поверхности полигона устраивается изолирующее (водозащитное) покрытие. По условиям безопасности устройство изолирующего покрытия должно сопровождаться созданием системы газового дренажа, например, в виде сети вертикальных дренажных скважин (газовыпусков), которые могут наращиваться от основания полигона по мере укладки слоев отходов (восстающие скважины) либо закладываться впоследствии с поверхности уже сформированного полигона. Эта же система используется для сбора газа с целью его утилизации.

Оптимальная схема расположения скважин при их закладке на заполненных секциях полигона устанавливается опытным путем. Некоторые авторы, исходя из опыта, рекомендуют принимать радиусы влияния скважин активной дегазации в диапазоне 30–45 м, исходя из этого, устанавливать средние расстояния между скважинами [1]. Параметры системы газового дренажа для проектируемых полигонов выводятся расчетным путем с последующим уточнением по результатам эксплуата-

ции. Далее излагается способ расчета вертикального газового дренажа, разработанный при проектировании полигонов ТКО для городов Березники, Чайковский (Пермский край) и Сургут (ХМАО). Основные положения расчета впервые были опубликованы в сборнике [2].

Исходное положение расчета – равенство расходов образования $Q_{гр}$ и разгрузки Q_r газа в зоне влияния скважины:

$$Q_{гр} = Q_r \quad (1)$$

В общем случае

$$Q_r = Q_c + Q_n \quad (2)$$

где Q_c – расход разгрузки газа через скважину (дебит скважины); Q_n – расход разгрузки газа через поверхность.

Сначала рассматривается задача разгрузки биогаза только через скважины в предположении абсолютно непроницаемой поверхности полигона:

$$Q_n = 0; Q_r = Q_c \quad (3)$$

затем – разгрузки одновременно через скважины и полупроницаемую поверхность (2) в режимах пассивного и активного отвода газа.

РАЗГРУЗКА БИОГАЗА ЧЕРЕЗ СКВАЖИНЫ ПРИ НЕПРЕНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На пути продвижения газа к дренажной скважине можно выделить три участка:

- внешний, от границы влияния данной скважины, определяемой радиусом ее влияния R , до контура внешнего фильтра скважины;

- входной, от контура внешнего фильтра до внутренней поверхности трубы скважины;
- внутренний, в полости трубы скважины до выхода из нее.

Газ на пути своего движения преодолевает специфическое для каждого из участков сопротивление с соответствующей затратой энергии, выражающейся в потере напора на данном участке. Сумма потерь напора по участкам позволяет судить о величине избыточного давления в теле полигона.

Схема расположения скважин газового дренажа и расчетных участков приведена на рис. 1.

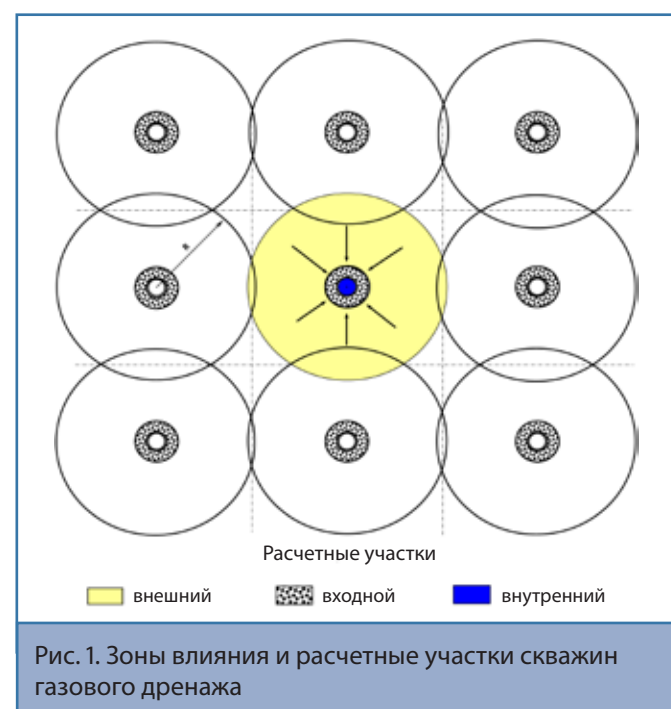


Рис. 1. Зоны влияния и расчетные участки скважин газового дренажа

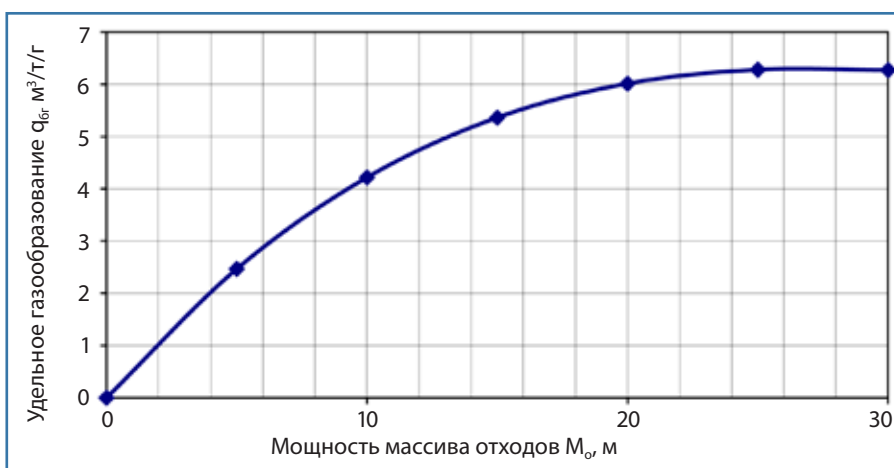


Рис. 2. Зависимость удельного газообразования от мощности массива отходов

Внешний участок

Расчет внешнего участка выполняется по формулам гидрогеологии с использованием в них физических параметров газа.

Рассматривается случай, когда дренажные скважины прорезают газоносный пласт, перекрытый непроницаемым слоем, и доходят до газоупорного основания полигона; в терминах гидрогеологии они являются скважинами совершенного типа в напорных условиях. Поскольку продуцирование биогаза происходит относительно равномерно по площади массива отходов, каждый газовыпуск можно

рассматривать как отдельно работающую скважину с круговым контуром питания в напорных водах, дебит которой рассчитывается по формуле Дюпюи [3]. После пересчета ее параметров с воды на газ и выполнения преобразований получаем:

$$S_1 = k_n(10^{-5}/K_{фo}) \rho_o q_{гр} F(0,5 \lg F - \lg r_{фo} - 0,25)(M_r/M_1), \quad (4)$$

где:

$F = L_c^2$ – площадь поверхности отходов на одну скважину, м²;

L_c – средний шаг скважин, расположенных по прямоугольной сетке, м;
 ρ_o – плотность отходов в теле полигона, т/м³;

$q_{гр}$ – удельное газообразование, м³/год на 1 т накопленных отходов;

S_1 – эффективное значение потери напора газа от границы зоны влияния до внешнего фильтра скважины, выраженное в метрах водяного столба (мвс);

k_n – коэффициент неравномерности. С учетом имеющихся данных о распределении интенсивности газообразования по глубине свалочного тела $k_n \approx 3$;

$r_{фo}$ – радиус внешнего фильтра скважины, м;

M_r – мощность газоносной толщи, равная суммарной толщине слоев отходов, прорезаемых скважиной, м;

M_1 – суммарная мощность слоев, выполняющих функции горизонтального коллектора на пути движения газа к скважине, м.

Мощность газоносной толщи оценивается величиной:

$$M_r = 0,9 M_o, \quad (5)$$

где M_o – общая мощность массива отходов без водозащитного покрытия, м;

0,9 – коэффициент, учитывающий суммарную мощность слоев промежуточной грунтовой изоляции.

При расчете величины M_r предполагается, что: а) газ в горизонтальном направлении движется только по слоям отходов; б) в зоне аэрации глубиной до 2 м движение газа в горизонтальном направлении отсутствует. С учетом этого

$$M_1 = 0,9(M_o - 2). \quad (6)$$

Удельное газообразование зависит от высоты массива отходов на расчетную дату и темпов ее наращивания. В среднем за период эксплуатации полигона $q_{гр} = 4-6$ (м³/т)/год. При $M_o \leq 30$ м и годовом темпе приращения мощности массива отходов $\Delta M_o/\Delta t = 2-2,5$ м/год получена следующая зависимость:

$$q_{гр} = 0,636 M_r - 0,02(M_r)^2 + 0,0002(M_r)^3. \quad (7)$$

График зависимости $q_{гр} = f(M_r)$ представлен на рис. 2.

Плотность отходов ρ_o зависит от многих факторов, в том числе от степени уплотнения при укладке отходов. При использовании тяжелого каткатрамбовщика типа TANA достигается плотность уложенных отходов $\rho_o = 0,9-1,0$ т/м³. Опубликованных данных по коэффициентам фильтрации для слежавшихся отходов немного. По Ren & Edwards [4], коэффициент проницаемости свалочного грунта составляет $k_n = 10^{-11}$ м². Этому значению соот-

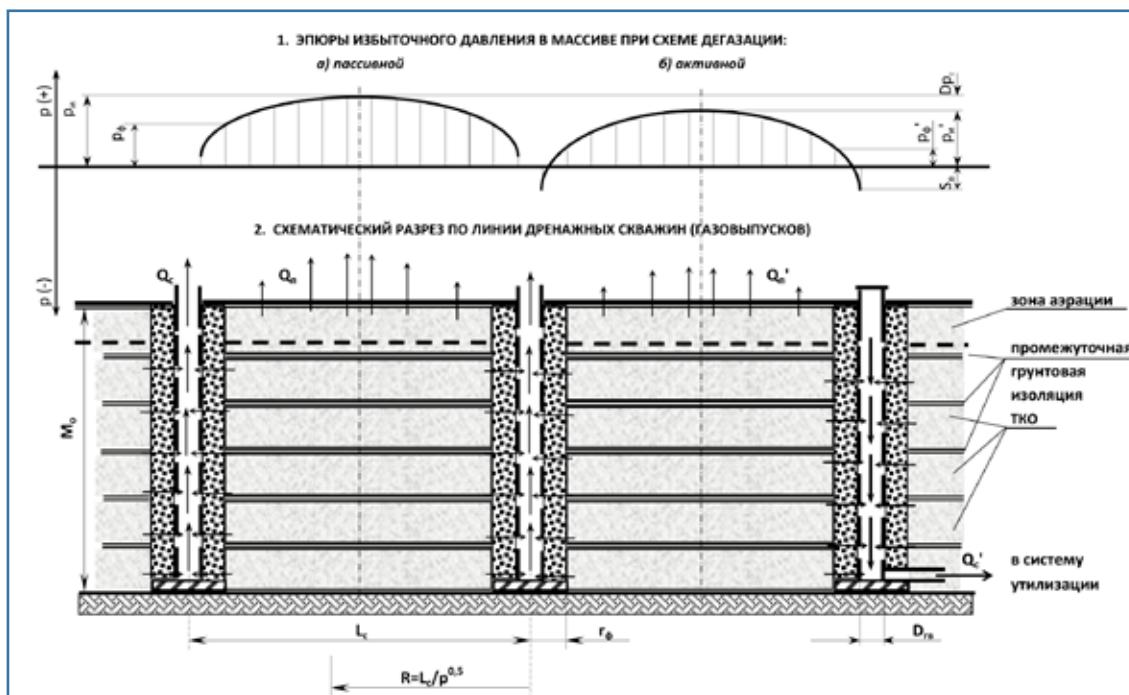


Рис. 3. Расчетная схема отведения биогаза через дренажные скважины и поверхность полигона

ветствует коэффициент фильтрации $K_{\text{ф}} = 10^{-4} \text{ м/с} = 8,6 \text{ м/сут}$. В проектном расчете целесообразно предусматривать снижение со временем расчетной величины $K_{\text{ф}}$, обусловленное изменением структуры и повышением плотности отходов по мере удаления продуктов разложения органики.

Входной участок
Потери напора по формуле (4) соответствуют грунтовым скважинам с открытыми стенками. Если скважина обсажена, то на входе возникают дополнительные потери напора на преодоление сопротивления внешнего фильтра и перфорированной стенки обсадной трубы скважины – гидравлический скачок на входе [5]. Преодоление газом в горизонтальном направлении слоистой структуры «наружная обсыпка – перфорированная стенка» можно уподобить фильтрации через экран, имеющий повреждения в виде отверстий. Потеря напора S_2 (м. вод.ст.) при прохождении расхода газа Q_c через такой экран рассчитывается по следующей формуле (дается без вывода):

$$S_2 = k_n \times 10^{-5} F p_o q_{gr} (M_r / M_1) / [K_{ap} \eta (D_{gr})^{0.5}], \tag{8}$$

где:
 K_{ap} – коэффициент фильтрации дренирующей обсыпки (внешнего фильтра) скважины, м/сут;
 D_{gr} – диаметр трубы скважины (газовыпуска), м;
 η – коэффициент эффективности экрана [6].
Величина K_{ap} косвенно зависит от диаметра скважины: чем больше последний, тем больше толщина внешнего фильтра, средняя крупность слагающих его фракций и коэффициент фильтрации.

Коэффициент η учитывает местное сопротивление на входе и выходе из дренажных отверстий и рассчитывается по известным рекомендациям В. П. Недриги [6] в зависимости от формы, размера и частоты расположения отверстий. Например, для круглых дренажных отверстий диаметром 2 см, расположенных по сетке со стороной 0,35 м, $\eta = 0,13$.

Внутренний участок
После входа в скважину газ движется по ней вверх, преодолевая сопротивление стенок трубы и щебеноч-

Результаты расчета вертикального газового дренажа (пример)								
Мощность массива отходов, M_o , м	Удельное газообразование, q_{6r} м³/т/год	Генерация биогаза с площади влияния F, Q_{6r} м³/сут	Пассивный режим дегазации			Активный режим дегазации		
			Макс. давление в массиве, p_n , м вод. ст.	Дебит газа на 1 скважине Q_c , м³/сут	Эффективность дегазации, ϵ %	Допустимое разрежение на устье, p_u м вод. ст.	Дебит газа на 1 скважине Q_c , м³/сут	Эффективность дегазации, ϵ , %
Открытая поверхность полигона (без верхнего изолирующего покрытия)								
Шаг скважин $L_c = 50,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 2500$ м²					
5,0	2,47	68,4	0,007	1,1	1,6	0,000	1,1	1,6
10,0	4,22	234,0	0,033	14,2	6,0	0,000	14,2	6,0
15,0	5,36	446,3	0,080	54,8	12,3	0,000	54,8	12,3
20,0	6,01	667,3	0,137	130,4	19,5	0,085	195,8	29,3
25,0	6,28	871,1	0,194	236,7	27,2	0,150	370,1	42,5
30,0	6,27	1044,0	0,244	361,9	34,7	0,190	546,4	52,3
Шаг скважин $L_c = 40,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 1600$ м²					
5,0	2,47	43,8	0,007	1,1	2,5	0,000	1,1	2,5
10,0	4,22	149,8	0,032	14,0	9,4	0,000	14,0	9,4
15,0	5,36	285,6	0,074	52,4	18,3	0,000	52,4	18,3
20,0	6,01	427,1	0,121	119,7	28,0	0,060	162,3	38,0
25,0	6,28	557,5	0,166	208,7	37,4	0,105	291,5	52,3
30,0	6,27	668,2	0,200	307,1	46,0	0,130	414,9	62,1
Шаг скважин $L_c = 30,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 900$ м²					
5,0	2,47	24,6	0,007	1,1	4,5	0,000	1,1	4,5
10,0	4,22	84,2	0,029	13,4	16,0	0,000	13,4	16,0
15,0	5,36	160,7	0,063	47,0	29,2	0,000	47,0	29,2
20,0	6,01	240,2	0,098	100,3	41,8	0,025	115,3	48,0
25,0	6,28	313,6	0,125	164,3	52,4	0,050	195,6	62,4
30,0	6,27	375,8	0,143	229,3	61,0	0,060	266,8	71,0
Закрытая поверхность полигона (с верхним изолирующим покрытием)								
Шаг скважин $L_c = 50,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 2500$ м²					
5,0	2,47	68,4	0,042	6,7	9,9	0,000	6,7	9,9
10,0	4,22	234,0	0,132	55,9	23,9	0,045	70,4	30,1
15,0	5,36	446,3	0,228	157,4	35,3	0,160	228,9	51,3
20,0	6,01	667,3	0,311	297,3	44,6	0,240	424,5	63,6
25,0	6,28	871,1	0,372	454,2	52,1	0,285	620,7	71,3
30,0	6,27	1044,0	0,410	609,5	58,4	0,300	795,1	76,2
Шаг скважин $L_c = 40,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 1600$ м²					
5,0	2,47	43,8	0,040	6,5	14,9	0,000	6,5	14,9
10,0	4,22	149,8	0,114	50,1	33,5	0,025	57,4	38,3
15,0	5,36	285,6	0,187	133,2	46,6	0,100	171,2	59,9
20,0	6,01	427,1	0,244	240,5	56,3	0,155	307,3	71,9
25,0	6,28	557,5	0,281	354,5	63,6	0,180	437,1	78,4
30,0	6,27	668,2	0,302	462,5	69,2	0,185	549,9	82,3
Шаг скважин $L_c = 30,0$ м			Площадь влияния 1 скважины $F = 900$ м²					
5,0	2,47	24,6	0,035	6,0	24,4	0,000	6,0	24,4
10,0	4,22	84,2	0,089	40,5	48,1	0,000	40,5	48,1
15,0	5,36	160,7	0,133	99,1	61,7	0,050	113,3	70,5
20,0	6,01	240,2	0,164	169,0	70,3	0,075	191,9	79,9
25,0	6,28	313,6	0,182	239,2	76,3	0,085	265,7	84,7
30,0	6,27	375,8	0,189	302,7	80,5	0,085	329,2	87,6

ной засыпки ее внутренней полости, если такая засыпка предусмотрена проектом для повышения устойчивости ствола скважины. При засыпке скважины потери напора на внутреннем участке могут превзойти суммарные потери на внешнем и

входном участках. Поэтому такая засыпка с точки зрения эффективности дегазации нежелательна. В открытом стволе скважины потери напора на внутреннем участке составят $n \times 10^{-5}$ м. вод.ст., и ими можно пренебречь.

Избыточное давление в массиве отходов

Максимальное избыточное (сверх атмосферного) давление внутри массива отходов будет иметь место на границах зон влияния смежных скважин. При измерении давления в тех же единицах, что и напоры (м. вод.ст.), его максимальное значение $p_{\text{и}}$ численно равно суммарным потерям напора по участкам. Пренебрегая потерями напора на внутреннем участке, имеем

$$p_{\text{и}} = S_1 + S_2. \quad (9)$$

РАЗГРУЗКА БИОГАЗА ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ПОЛИГОНА И ДРЕНАЖНЫЕ СКВАЖИНЫ

Расчетная схема приведена на рис. 3.

Общий расход разгрузки также принимается равным суточному объему генерации биогаза в зоне влияния скважины (1), но в отличие от предыдущего распределяется между скважинами и поверхностью полигона (2). Общий расход газа при смешанной схеме разгрузки

$$Q_{\text{бг}} = Q_{\text{г}} = (\alpha + \beta \phi F) p_{\text{и}}, \quad (10)$$

где $p_{\text{и}}$ – результирующее избыточное давление в теле полигона при разгрузке газа по смешанной схеме, м. вод.ст.;

α – коэффициент пропорциональности между расходом газа и потерей напора на скважине (проводимость в горизонтальном направлении), устанавливаемый по результатам предыдущего расчета; м²/сут;

β – удельная проводимость в вертикальном направлении, 1/сут:

$$\beta = 100/\Sigma f, \quad (11)$$

$$\Sigma f = f_o + f_{\text{из}} + f_{\text{п}} = h_o/K_o + h_{\text{из}}/K_{\text{из}} + h_{\text{п}}/K_{\text{п}}, \quad (12)$$

здесь f – коэффициенты сопротивления в вертикальном направлении, сут;

$K_{\text{п}}, K_{\text{из}}, K_o$ – коэффициенты фильтрации водозащитного покрытия, промежуточной изоляции и свалочного грунта в вертикальном направлении, м/сут;

$h_{\text{п}}$ – суммарная толщина слабопроницаемых слоев покрытия (обычно 0,5–1,0 м);

$h_{\text{из}}, h_o$ – средневзвешенные значения мощности слоев промежуточной изоляции и уплотненных отходов, преодолеваемых газом в вертикальном направлении до подошвы покрытия, м;

100 – коэффициент пересчета расхода с воды на газ;

$\phi \approx 0,82$ – коэффициент, учитывающий снижение среднего давления в теле полигона относительно максимального $p_{\text{и}}$ за счет депрессии потока газа у скважин.

Значение $K_{\text{п}}$ зависит от вида грунта и степени его уплотнения, как правило, $0,01 > K_{\text{п}} > 0,001$ м/сут. При отсутствии водозащитного покрытия принимается $h_{\text{п}}/K_{\text{п}} = 0$.

Массив уплотненных отходов в теле полигона имеет слоистую структуру с меньшей проницаемостью в вертикальном направлении, чем в горизонтальном. Вследствие этого K_o составляет $(0,2–0,5)K_{\text{фо}}$.

Величина h_o определяется глубиной залегания центра газопродуктивной зоны и составляет ориентировочно

$$h_o \approx 0,3M_o + 2, \quad (13)$$

расчетная толщина промежуточной грунтовой изоляции

$$h_{\text{из}} = 0,03M_o. \quad (14)$$

Из выражения (10) находится результирующее значение избыточного давления в теле полигона, необходимого для преодоления сопротивления при параллельной разгрузке через скважины и поверхность, а также доля разгрузки через скважины относительно общего объема генерации биогаза (эффективность дегазации):

$$\varepsilon\% = 100Q_c/Q_{\text{г}} = 100/[1 + (\beta/\alpha)\phi F]. \quad (15)$$

ПРИНУДИТЕЛЬНЫЙ ОТВОД БИОГАЗА

При осуществлении мероприятий по утилизации биогаза организуется его принудительный отвод от дренажных скважин. С этой целью в газовых выпусках с помощью вентиляционной установки создается разрежение $S_{\text{в}} = 0,10–0,15$ м. вод.ст. [2]. Это разрежение увеличивает напор на газовыпусках и снижает избыточное давление внутри массива с соответствующим перераспределением расхода биогаза через скважины и поверхность:

$$Q_c' = Q_c + \Delta Q = \alpha(p_{\text{и}} - \Delta p_{\text{и}} + S_{\text{в}}); \quad (16)$$

$$Q_{\text{п}}' = Q_{\text{п}} - \Delta Q = \beta F \phi (p_{\text{и}} - \Delta p_{\text{и}}). \quad (17)$$

Эффективность дегазации в случае принудительного отвода биогаза составляет

$$(\varepsilon')\% = 100Q_c'/Q_{\text{г}}. \quad (18)$$

Решая совместно уравнения (16)–(18), получаем зависимости для определения снижения давления $\Delta p_{\text{и}}$ и результирующего давления $p_{\text{и}}'$ в теле полигона при наличии принудительного отвода биогаза из газовыпусков:

$$\Delta p_{\text{и}} = \alpha S_{\text{в}}/(\alpha + \beta \phi F); \quad (19)$$

$$p_{\text{и}}' = p_{\text{и}} - \Delta p_{\text{и}} = (Q_{\text{бг}} - \alpha S_{\text{в}})/(\alpha + \beta \phi F). \quad (20)$$

Давление на внешнем фильтре скважины находится по формуле

$$p_{\text{ф}}' = p_{\text{и}}' - 0,01(\varepsilon')\% S_1, \quad (21)$$

где S_1 – падение напора на внешнем участке зоны влияния скважины, определяемое формулой (4).

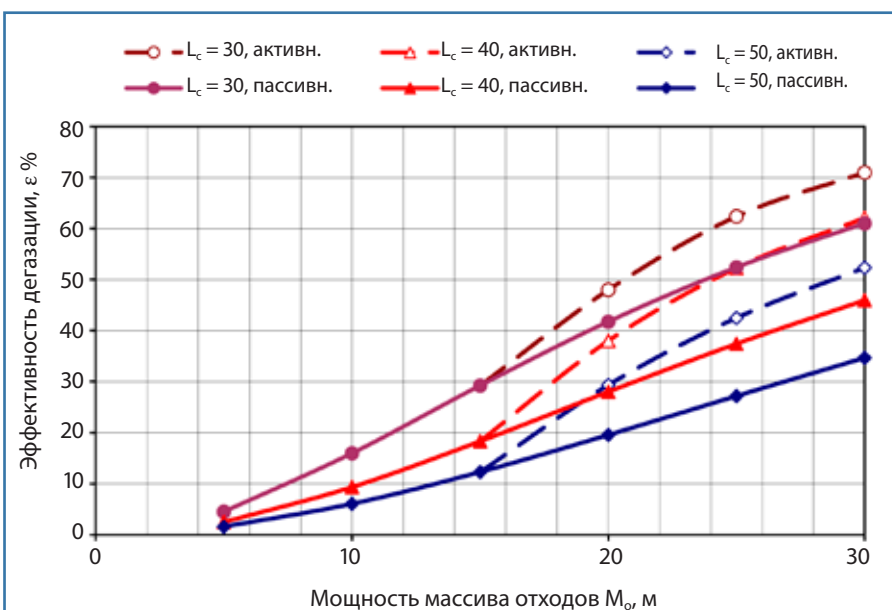


Рис. 4. Эффективность дегазации при отсутствии водозащитного покрытия полигона, в зависимости от шага скважин L_c (м)

Допустимое значение разрежения S_b устанавливается исходя из условия, что избыточное давление на внешнем фильтре скважины в режиме активной дегазации p_{ϕ}' должно быть не менее 0,05 м вод. ст., так как в противном случае возможны подсосы воздуха с поверхности с образованием взрывоопасной газозвушной смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В таблице приведены результаты расчетов, выполненных для одного из полигонов ТКО, запроектированных АО «ВНИИ Галургии», при следующих исходных данных: $K_{\phi 0} = 2,0$ м/сут; $K_{\text{ар}} = 4,5$ м/сут; $K_0 = 0,2$ м/сут; $K_{\text{из}} = 0,1$ м/сут; $\rho_0 = 0,9$ т/м³; $D_{\text{гв}} = 0,6$ м; $h_{\text{п}} = 0,6$ м; $K_{\text{п}} = 0,005$ м/сут; $K_{\text{н}} = 3$; $\eta = 0,13$. Мощность массива отходов M_0 – от 5 до 30 м, шаг скважин L_c – 30, 40 и 50 м.

Результаты расчетов (рис. 4, 5, таблица) позволяют сделать вывод, что включение режима активной дегазации с отбором биогаза на утилизацию в условиях открытой поверхности полигона целесообразно при достижении высоты массива отходов 15–20 м, при этом эф-

фективность дегазации составит 20–30 %. После устройства водозащитного покрытия эффективность дегазации существенно возрастает: при $M_0 = 10$ м она составит 30–40 %, при $M_0 = 20$ м – 60–70 %, при $M_0 = 30$ м – до 80 %.

Эффективность дегазации возрастает с уменьшением расстояний между скважинами, однако с учетом технологических ограничений в варианте с восстанавливаемыми скважинами оптимальны значения $L_c = 40$ –45 м. ♻️

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологический регламент получения биогаза с полигонов ТКО. – М.: АКХ им. К. Д. Памфилова, 1990.
2. Вострецов С. П. Расчет вертикального газового дренажа полигона ТКО – Тез. докл. Второй в Украине международной конференции «Энергия из биомассы». // Киев, 22–24.09.2004.
3. Справочное руководство гидрогеолога. – Л.: Гостоптехиздат, 1959.
4. Ren T. X., Edwards J. S. CFD aids environmental management in landfill operations (Australian). – Environmental Management. – 1998. P. 147–154.

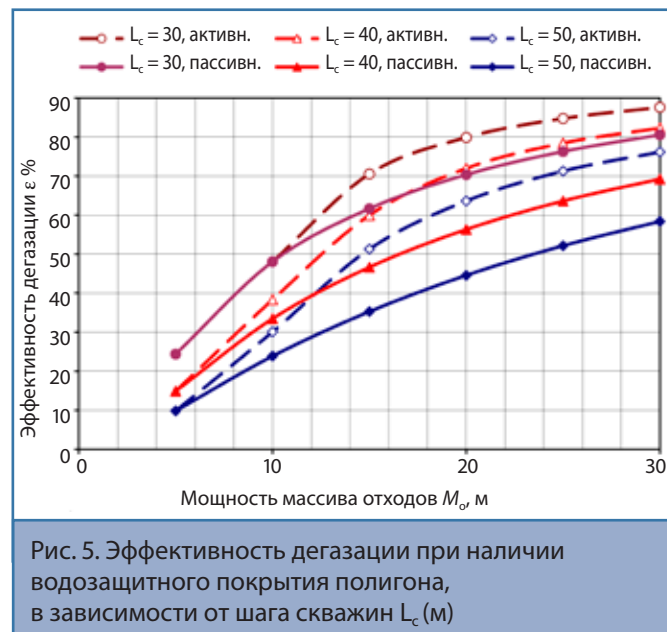


Рис. 5. Эффективность дегазации при наличии водозащитного покрытия полигона, в зависимости от шага скважин L_c (м)

5. Климентов П. П., Кононов В. М. Динамика подземных вод. – М.: Высшая школа, 1985.
6. Недрига В. П. Инженерная защита подземных вод от загрязнения промышленными стоками. – М.: Стройиздат, 1977.



Экологически безопасные полигоны ТКО - Мы вернем природу и качество жизни

Компания «ЭКОКОМ» работает с 2001 г. в сфере проектирования и строительства современных инженерных сооружений для полигонов ТКО. Цель компании: переоборудовать полигоны ТКО в современные и экологически безопасные полигоны ТКО в соответствии со всеми нормами.

- Очистные сооружения для очистки фильтрата полигонов ТКО: степень очистки 99,9%
- Газовое оборудование для сбора, очистки (обезвреживания) и утилизации свалочного газа
- Энергетическое оборудование для получения электричества и тепла



ООО «ЭКОКОМ» 111141 Москва, ул. Плеханова д. 9/стр. 1
Тел.: +7 495 672 73 16, E-mail: office.russia@ecocom.at, www.ecocom.at