

УДК 550.832:662.767.2

Куций Д.В.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОКРУГ ВЕРТИКАЛЬНОЙ БИОГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ

Представлено та проаналізовано результати експериментального дослідження просторового розподілу тиску та температури навколо вертикальної свердловини для різних режимів відкачування біогазу на полігоні ТПВ.

Представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования пространственного распределения давления и температуры вокруг вертикальной скважины для разных режимов откачивания биогаза на полигоне ТБО.

Experimental results of spatial pressure and temperature distribution surrounding a vertical well under different landfill gas extraction conditions are presented and analyzed.

Ключевые слова: полигон, твердые бытовые отходы, газосборная скважина, биогаз, давление, инфильтрация.

ГС – газосборная скважина;
ТБО – твердые бытовые отходы;

ЭС – экспериментальная скважина.

Введение

Внутри большинства полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) протекают анаэробные процессы разложения органических веществ с образованием биогаза, влияющие на изменение физико-химических условий в теле полигона ТБО. В результате накопления биогаза в поровом пространстве полигона ТБО возникает избыточное давление, изменяющее механические свойства полигона. При больших значениях давление может приводить к разрушению верхнего слоя и склонов полигона ТБО, а также к замедлению его проседания. Эти проблемы изучены в работах [1,2], в которых также приведены результаты продолжительных экспериментальных измерений распределения давления по глубине тела полигона ТБО в стационарных условиях (без откачивания биогаза).

Под действием избыточного давления биогаз может мигрировать за пределы полигона ТБО в грунты и атмосферный воздух, что обуславливает негативное влияние полигонов ТБО на окружающую среду. Количество биогаза, покидающее пределы полигона ТБО, может определяться с использованием измерений давления на разных глубинах полигона ТБО и в окружающих грунтах. Такие измерения были выполнены в работах Бентли и др. [3,4].

Повышение температуры является одним из основных показателей интенсивности протекающих процессов образования метана. Данные процессы могут происходить при температурах от 20 до 65 °С, однако максимальная интенсивность метанообразования наблюдается в диапазоне 30...40 °С [5]. Температура в теле полигона может зависеть от сезонных изменений атмосферной температуры, температуры грунтов, графика размещения отходов, их возраста, глубины, влажности. Распределение температуры в теле полигонов ТБО и влияние указанных выше факторов наиболее широко рассмотрено в работах Есиллера и Хансона [6,7].

Изучение характера изменения давления и температуры в динамических условиях (при откачивании биогаза) является важной задачей для обеспечения эффективного сбора биогаза. В работе Лофи [8] на основе экспериментальных данных определены форма и протяженность зоны разрежения вокруг газосборных скважин (ГС). Автор исследовал влияние на геометрию зоны разрежения глубины перфорации трубы, соотношения давления и расхода на ГС, а также изменения атмосферных параметров.

Изменение температуры, вызванное подсосом атмосферного воздуха в тело полигона ТБО в районе ГС, изучено Крутчером и др. [9]. В

частности, автор исследовал окисление метана в верхнем слое полигона и связанный с ним рост температуры.

Целью данной работы является исследование характера изменения распределения давления и температуры при различных режимах откачивания биогаза (повышение или понижение разряжения на ГС). Целесообразность проведения исследования определяется недостатком доступной информации, необходимой для понимания закономерностей изменения давления и температуры при изменении разряжения на ГС, которое в свою очередь необходимо для увеличения эффективности сбора биогаза.

Объект исследования и используемое оборудование

Исследования проводились на действующем полигоне ТБО, расположенном в г. Борисполь, Киевской области. Полигон введен в эксплуатацию в 2003 году в соответствии с проектом на месте отработанного песчаного карьера. Проектная площадь составляет 6,5 га, нижняя поверхность полигона образована защитным слоем, состоящим из полиэтиленовой геомембраны и слоя глины.

Полигон принимает исключительно ТБО в количестве около 85 тыс. тон в год. Отходы складываются в пределах отдельных карт размером приблизительно 50×50 м с промежуточной пересыпкой через каждые 3 м. На момент проведения исследований по данным топографической съемки (рис. 1) отходы на полигоне занимали площадь около 6,0 га. Общее количество отходов оценивалось в 0,723 млн. тонн, средняя глубина составляла 18 м.

Экспериментальная система сбора была сооружена в центральной части полигона ТБО на засыпанном участке. В состав системы входила одна вертикальная ГС, которая является частью строящейся промышленной системы сбора, а также пять экспериментальных скважин (ЭС), сооруженные в двух перпендикулярных направлениях на разных расстояниях от ГС (рис. 1).

ГС смонтирована в шурфе диаметром 450 мм и глубиной 12,3 м. Вдоль центральной оси шурфа размещалась полиэтиленовая труба диаметром 110 мм. Нижние 6,7 м трубы перфорированы и обсыпаны щебнем. Верхняя часть трубы дли-

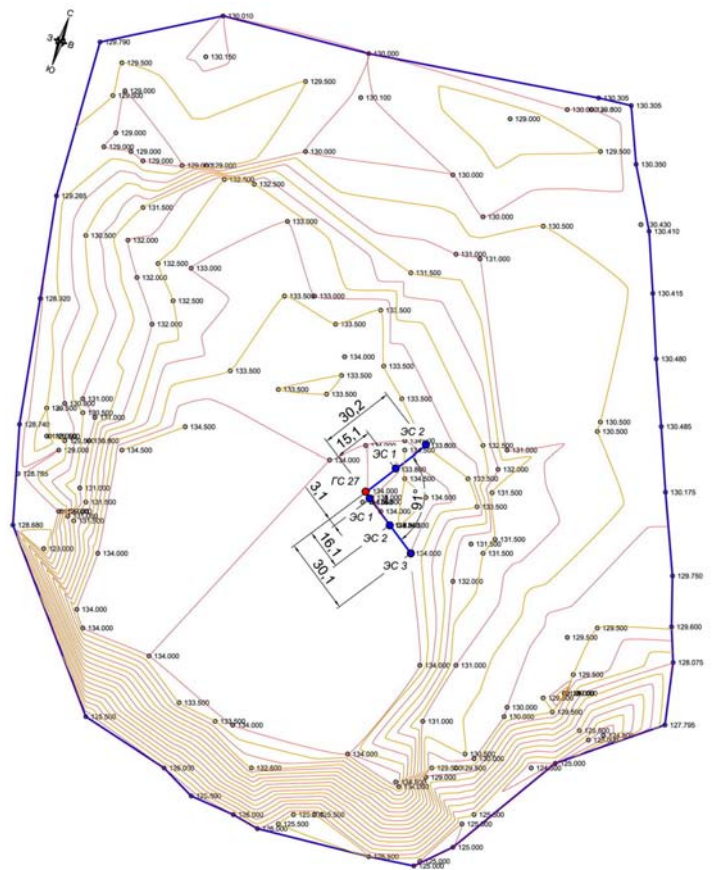


Рис. 1. Топографическая съемка полигона с расположением экспериментальной системы сбора биогаза.

ной 4,8 м сплошная. В нижней части сплошного участка сооружалась пробка из бентонита высотой 0,7 м. Оставшееся пространство было уплотнено глиной до поверхности полигона ТБО.

ЭС сооружались в шурфах диаметром 350 мм и глубиной 6...8 м. При бурении шурфов через каждые 2...3 метра отбирались образцы отходов с помощью цилиндрической желонки. В процессе отбора визуально оценивались состав, степень разложения и влажность ТБО. По этим данным построен разрез полигона ТБО в районе ЭС (рис. 2). Затем образцы отходов направлялись в лабораторию для дальнейшего исследования.

В пробуренном шурфе вдоль стенки устанавливались датчики температуры НТФ 250 на глубинах около 1, 3, 6 и 8 м. Электрические разъемы датчиков температуры выводились на поверхность. Затем в пробуренный шурф последовательно вставлялись три полиэтиленовые трубы диаметром 25 мм на глубину около 8 м, 6 м и 3 м.

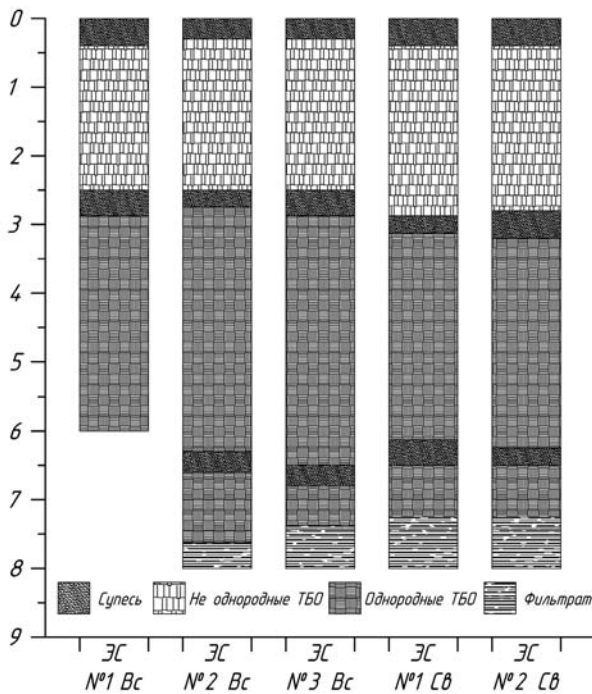


Рис. 2. Вертикальный разрез участка полигона в районе ЭС.

На нижнем конце каждой трубы устанавливалась заглушка, от которой начинался перфорированный участок трубы длиной 0,5 м. Перфорация обсыпалась щебнем, выше щебня засыпался тонкий слой глины. Над глиной монтировалась пробка из бентонита высотой до 400 мм, после чего снова подсыпался слой глины до глубины установки следующей трубы или поверхности полигона ТБО. Концы труб над поверхностью полигона были оборудованы переходами на резьбовое соединение.

Для откачивания биогаза из ГС использовались центробежные газодувки Elmo Rietschle SKG200 и Rietschle SAP450 производительностью 80 и 450 м³/час соответственно. Установка и изменение режима откачивания осуществлялись с помощью перепускного вентиля, расположенного между всасывающим и нагнетающим патрубком газодувок, а также портативного датчика относительного давления Keller 33-PR, установленного на ГС и через интерфейс подключенного к компьютеру. Расход на газосборной скважине определялся на основании разницы давлений [10], создаваемой камерной диафрагмой ДКС 0,6-50, установленной на прямом участке металлической трубы между ГС и газодувкой, где

также располагался биметаллический термометр ТБУ-63 и кран со штуцером для отбора биогаза. Дифференциальное давление на диафрагме и состав биогаза измерялись с помощью портативного газоанализатора LandTec GEM500.

ЭС использовались для измерения относительного давления и температуры на различных глубинах в теле полигона ТБО. Для измерения относительного давления применялись датчики Keller 33-PR, погрешность измерения составляла 0,05 %. Температура измерялась одноканальным измерителем температуры ИТП-3-01 с погрешностью 0,5 %. Одновременно с измерениями на ЭС проводился мониторинг абсолютного давления и температуры атмосферного воздуха на поверхности полигона ТБО. Для этой цели использовался датчик давления Keller 33-РАА и датчик температуры НТФ 250.

Методика проведения исследований

Измерения давления и температуры биогаза осуществлялось в стационарных условиях без откачивания биогаза и в динамических условиях с откачиванием биогаза при различных режимах. Продолжительность цикла измерений в стационарных условиях составила четыре дня. Измерения параметров на ЭС проводились с интервалом 12 часов ранним утром и вечером, когда температура атмосферного воздуха была приблизительно одинаковой.

Датчики давления устанавливались на ЭС непосредственно перед измерениями. Давление регистрировалось через 10 минут после установки датчиков и стабилизации измеряемых значений. Продолжительность регистрации составляла две минуты с односекундным интервалом. Температура измерялась последовательно для всех датчиков температуры, установленных в ЭС.

После запуска газодувки и установки заданной величины разрежения на ГС (динамические условия) измерения проводились как на ГС, так и на ЭС. Изменялись перепад давления на камерной диафрагме, состав и температура биогаза, разрежение и температура в теле полигона ТБО и атмосферные давление и температура. Измерения на ГС и ЭС повторялись каждые 12 часов после запуска. Измерения на ГС использовались для подтверждения стабилизации параметров газоотбора. Если давление и концентрация био-

газа на ГС более чем на 10 % не соответствовали предыдущим измерениям, режим газоотбора не изменялся вплоть до момента стабилизации параметров. Продолжительность цикла измерений для одного режима газоотбора составляла 1,5...2 дня. Процедура измерений на ЭС была аналогичной процедуре в стационарных условиях.

После стабилизации режима измерений величина разряжения на ГС увеличивалась с шагом изменения разряжения 2000 Па. Всего было реализовано 6 режимов откачивания. Результаты измерений усреднялись для определенной глубины полигона ТБО и для каждого режима измерений, проведенного в стационарных или динамических условиях с целью исключения влияния суточного изменения атмосферной температуры и давления.

Результаты исследований

Распределение давления по глубине полигона на разных расстояниях от ГС в восточном и северном направлениях представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

На рис. 3 видно, что наибольшее давление в стационарных условиях наблюдается на средних глубинах полигона ТБО. На глубине около 3 м оно,

по-видимому, ограничено слоем грунта, используемого для пересыпки, а снизу – уровнем фильтрата в теле полигона ТБО. Предположительно газообразование в восточном направлении от ГС в основном развито в средних и нижних слоях полигона ТБО. Выход биогаза в верхнюю часть полигона ТБО ограничен слоем промежуточной пересыпки, где, в свою очередь, газообразование менее выражено из-за преобладания свежих отходов. Возраст ТБО подтвержден датами упаковочных материалов и журналов, обнаруженных в ТБО на глубине 2 и 3 м.

При откачивании биогаза изменение давления происходит преимущественно в горизонтальном направлении на средних глубинах, что объясняется большей проницаемостью ТБО в горизонтальном направлении, чем в вертикальном. Исключением является область возле ЭС № 2 (рис. 3,б), где изменение давления наблюдается на глубине 3 метра. Это, по-видимому, вызвано наличием в ТБО области с низкой проницаемостью возле ЭС № 2 на глубине 6 м. Подобный эффект был отмечен в работе [8], авторы которой указывают, что биогаз может перемещаться по пути наименьшего сопротивления, избегая области низкой проницаемости в гетерогенном теле полигона ТБО.

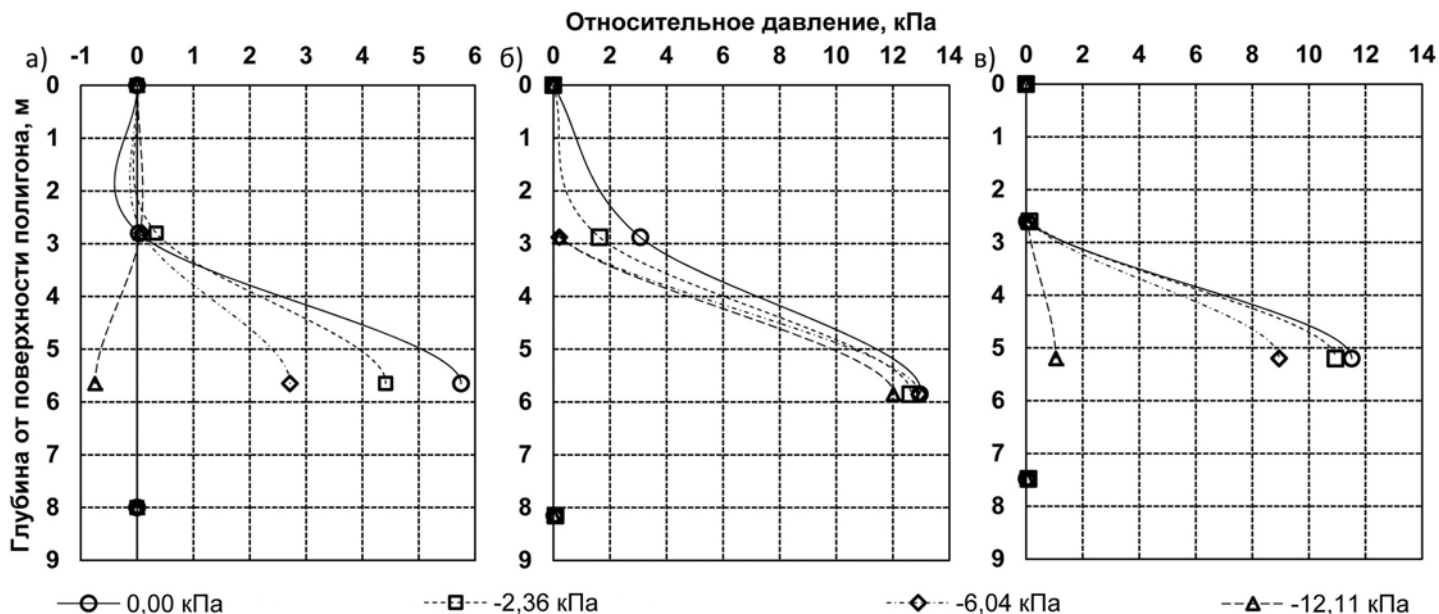


Рис. 3. Распределение давления по глубине полигона в восточном направлении в стационарных и динамических условиях на расстояниях от ГС: а) – 3 м, б) – 15 м и в) – 30 м.

На рис. 4 видно, что в северном направлении избыточное давление распределено по глубине полигона ТБО более равномерно и ограничено только уровнем фильтрата снизу. По-видимому, газообразование в данной части полигона происходит практически по всей глубине за исключением тонкого поверхностного слоя.

При откачивании биогаза на расстоянии 15 м от ГС (см. рис. 4,а) сначала меняется характер распределения давления в средней и нижней части полигона ТБО. При увеличении интенсивности откачки изменение давления происходит и в верхней части полигона ТБО. Последнее, по-видимому, объясняется отсутствием или относительно высокой проницаемостью слоя пересыпки. На расстоянии 30 метров от ГС изменение давления в зависимости от разряжения на ГС практически не наблюдается. Возможно, на расстоянии около 25 м от ГС существует изолированная область, которая ограничивает радиус действия скважины. По данным космических снимков было установлено, что изолированная область представляет собой отработанную предыдущую карту полигона ТБО, которая отделена от ГС засыпанным склоном.

Распределение температуры по глубине полигона на разных расстояниях от ГС в восточном и северном направлениях представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Видно, что температура растет с увеличением глубины полигона ТБО. Изменение температуры происходит только в верхнем слое ТБО глубиной до 1 м. Температура в нижних слоях полигона ТБО, где также расположен уровень фильтрата, остается постоянной и повышенной, достигая величины 42...46 °С.

При откачивании биогаза в средней и нижней части полигона ТБО характер распределения температуры остается неизменным. Однако, в верхней части на глубине от 1 до 3 м наблюдается незначительное (1...2 °С) увеличение температуры, которое может объясняться изменением режима течения биогаза и, как следствие, изменением направления перемещения теплового потока. В случае интенсивного откачивания (разряжение более 2360 Па) возможен незначительный подсос более холодного воздуха в тело полигона ТБО. В результате теплообмена на глубине 1...3 м температура незначительно понижается

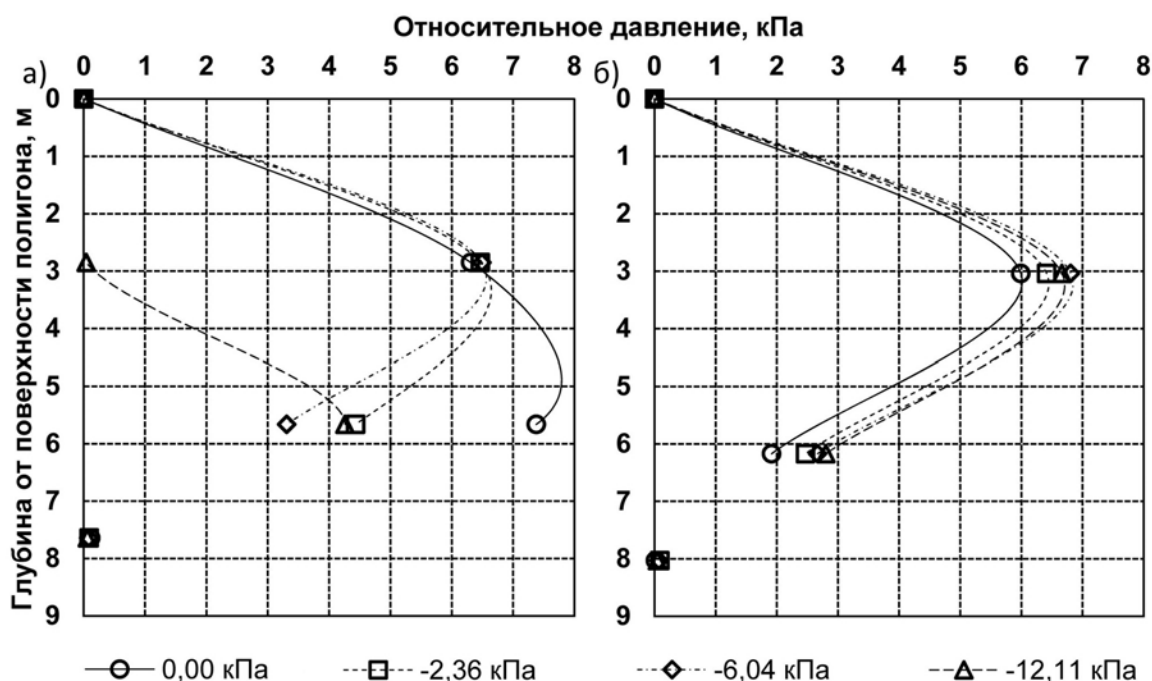


Рис. 4. Распределение давления по глубине полигона в северном направлении в стационарных и динамических условиях на расстояниях от ГС: а) – 15 м и б) – 30 м.

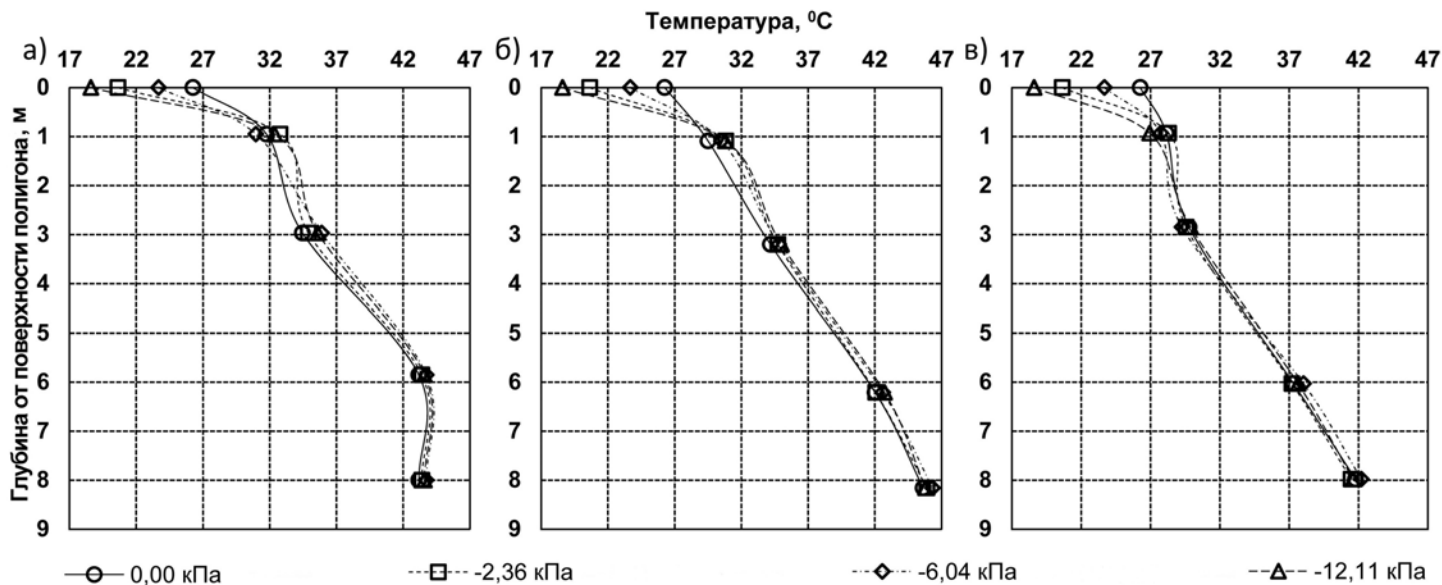


Рис. 5. Распределение температуры по глубине полигона в восточном направлении в стационарных и динамических условиях на расстояниях от ГС: а) – 3 м, б) – 15 м и в) – 30 м.

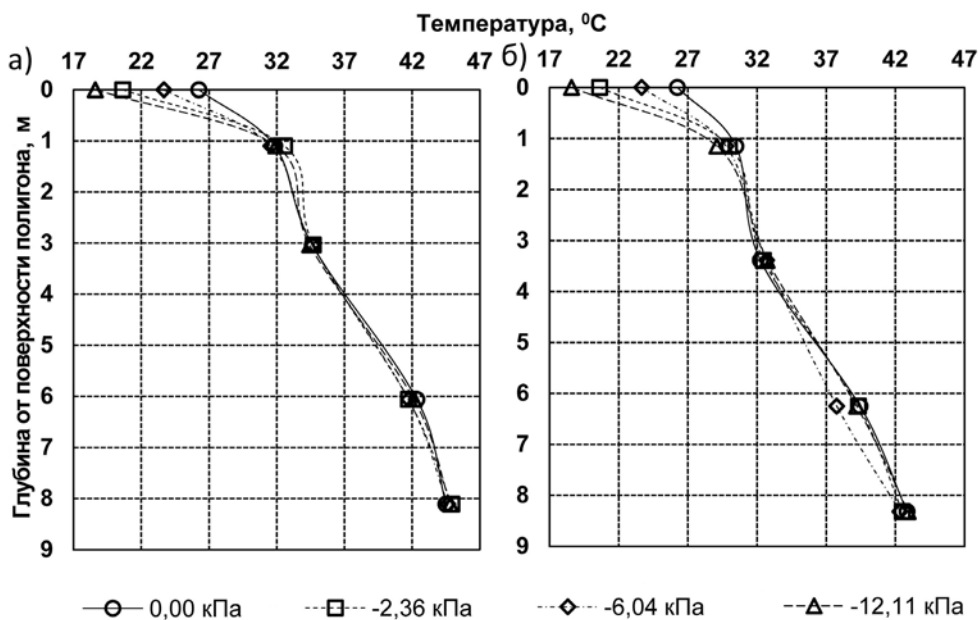


Рис. 6. Распределение температуры по глубине полигона в северном направлении в стационарных и динамических условиях на расстояниях от ГС: а) – 15 м и б) – 30 м.

по сравнению с менее интенсивными режимами откачивания. Для изолированной области (рис. 6,б) пространственное распределение температуры при откачивании остается постоянным. Наблюдаются изменения только на глубине около 1 м в зависимости от атмосферной температуры.

Анализ результатов исследований

Взаимосвязь изменения режима откачивания биогаза на газосборной скважине и вызванного им изменения давления на глубине около 6 м полигона ТБО представлено на рис. 7. В случае разрежения на ГС в 2 раза больше, чем давление на ГС в стационарных условиях, то есть когда раз-

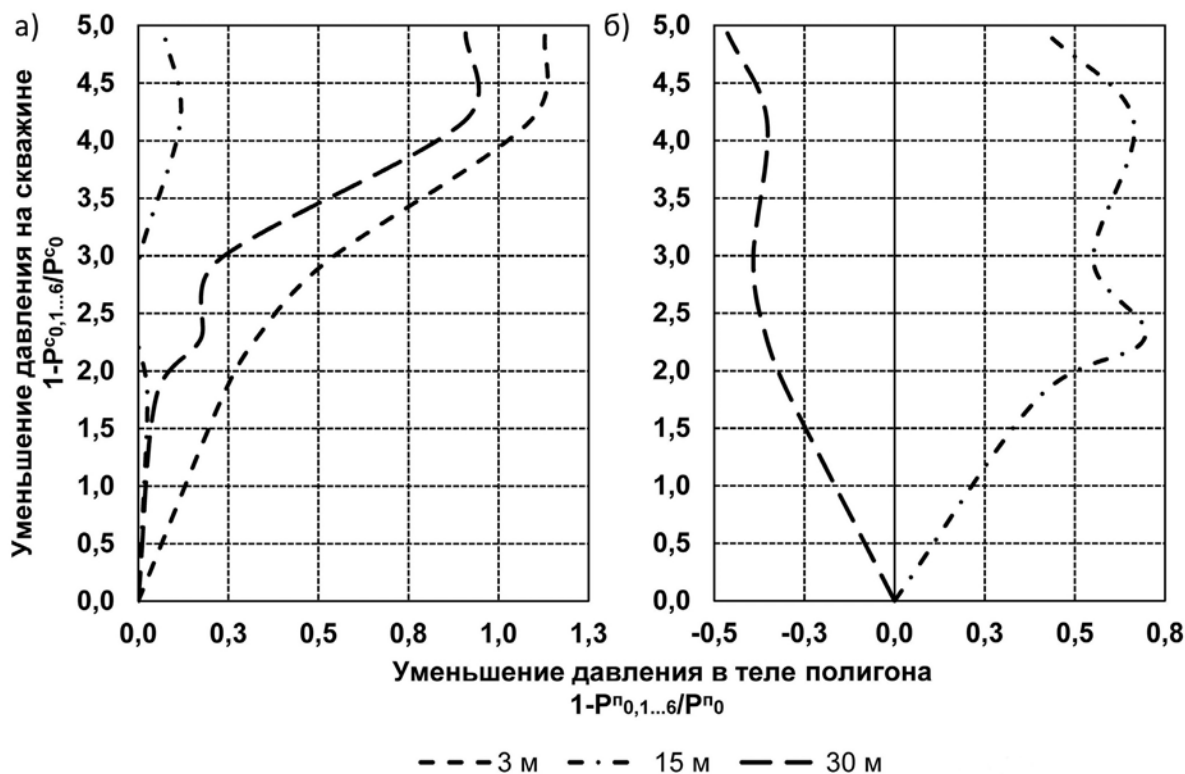


Рис. 7. Соотношение между изменением давления на ГС и изменение давления в теле полигона в: а) – восточном и б) – северном направлении.

режение на ГС численно равно давлению в стационарных условиях, наблюдается стабильное откачивание биогаза без признаков подсоса воздуха с поверхности полигона. Дальнейшее повышение разрежения на ГС приводит к скачкообразному изменению давления в теле полигона ТБО. При повышении разрежения на ГС более чем в 2,3 раза давление в теле полигона ТБО незначительно падает (на расстоянии 15 м и 30 м). Это указывает на контакт области пониженного давления с поверхностью и наличие подсоса воздуха. Дальнейшее повышение разрежения может привести к уменьшению содержания метана и увеличению содержания кислорода и азота в биогазе, что ограничивает возможности его использования, а также ухудшает условия метанообразования в теле полигона.

Повышение давление на ГС более чем в 4...4,3 раза приводит к последующему увеличению зоны пониженного давления в теле полигона ТБО и еще к большему подсосу воздуха. Во время эксплуатации ГС необходимо избегать таких режимов работы.

На рис. 7 видно, что интенсивность и характер изменения давления в разных направлениях отличается, особенно, в северном направлении, что, по-видимому, является следствием гетерогенности внутреннего строения полигона ТБО.

Выводы

Пространственное распределение давления в теле полигона ТБО существенно неравномерно, являясь в основном следствием разной интенсивности газообразования. Как в стационарных, так и в динамических условиях особенности изменения давления зависят от геологического строения полигона ТБО, горизонтальной и вертикальной проницаемости отходов и слоев промежуточной пересыпки, а также интенсивности откачивания биогаза.

В стационарных условиях характер пространственного распределения температуры в теле полигона ТБО остается постоянным и не зависит от изменения температуры атмосферы на глубинах более 1...3 м. В динамических условиях в центральной и нижней части полигона ТБО харак-

тер распределения температура практически не зависит от изменения режима откачивания. На глубине от 1 до 3 м температура несколько возрастает, что говорит об изменении направления движения биогаза и связанного с ним теплового потока. Увеличение интенсивности откачивания может приводить к незначительному падению температуры на глубине от 1 до 3 м, что может объясняться инфильтрацией более холодного воздуха.

Эффективный сбор биогаза на полигоне должен быть обеспечен при разрежении на ГС, не превышающем более чем 2 раза давление, измеренное в стационарных условиях. Дальнейшее увеличение разрежения на ГС с целью расширения области сбора биогаза не рекомендуется.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Zhan T.L.T.* Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou Landfill, China / T.L.T. Zhan, Y. M. Chen, W. A. Ling // *Engineering Geology*. – 2008. – Vol. 97, Iss. 3–4. – P. 97–111.

2. *Kadambala R.* Temporal and spatial pore water pressure distribution surrounding a vertical landfill leachate recirculation well / R.Kadambala, T.G.Townsend, J.Pradeep, K.Singh // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2011. – Vol. 8, Iss. 5. – P. 1692–1706.

3. *Bentley H.W.* Baro-pneumatic estimation of landfill gas generation rates at four landfills in the southeastern United States: conference proceedings of SWANA's 28th Annual Landfill Gas Symposium, March 7–10, 2005, San Diego, California / H.W. Bentley, S.J. Smith, T. Schrauf. – Silver Spring, Maryland: SWANA, 2005. – 1 CD-disk (CD-ROM). – System requirements: Autostart. – Title from list of papers and presentations.

4. *Smith S.J.* Systematic design of methane migration control system: conference proceedings of SWANA's 29th Annual Landfill Gas Symposium, March 27–30, 2006, St. Petersburg, Florida /, S. J. Smith, H. W. Bentley, K. Reaves. – Silver Spring, Maryland: SWANA, 2006. – 1 CD-disk (CD-ROM). – System requirements: Autostart. – Title from list of papers and presentations.

5. *Der Deponiegashaushalt* in Alttablärerungen – Leitfaden Deponiegas: Materialien zur Altlastenbearbeitung / [G. Rettenberger, H. Mezger, S. Urban-Kiss and partner]. – Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992. – 136 s.

6. *Yesiller N.* Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill [Electronic resource]: proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium / N. Yesiller, J. L. Hanson. – Padova: CISA Publisher, 2003. – 1 CD-disk (CD-ROM). – System requirements: Win 2000 ; Macromedia Flash Player 6 ; Adobe Acrobat Reader. – Title from proceeding paper.

7. *Hanson J.L.* Spatial and temporal temperature distribution in municipal solid waste landfills/ J. L. Hanson, N. Yesiller, N. K. Oettle // *Journal of Environmental Engineering*. – 2010. – Vol. 136, № 8. – P. 804–814.

8. *Landfilling of Waste: Biogas* / ed. by T. H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann. – [1st ed.]. – London: E&FN Spon, 1996. – 840 p.

9. *Crutcher A.J.* Temperature as an indicator of landfill behavior / A. J. Crutcher, F. A. Rovers, E. A. McBean // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 1982. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 213–223.

10. *Правило 28–64.* Измерение расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 124 с.

Получено 17.12.2012 г.