

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЛЕЮЩЕГО ГОРЕНИЯ В ПОРИСТЫХ ПОЧВЕННЫХ СИСТЕМАХ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ

М.И. Зайкина;

А.П. Решетов, кандидат технических наук, профессор;

В.Я. Трофимец, доктор технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Предложена методика экспериментальной оценки термодинамических характеристик состояния пористой почвенной системы при внешнем тепловом нагреве, и проведены эксперименты по изучению динамики роста температуры в пористых системах при внешнем тепловом воздействии. На поверхности всех изученных образцов рост температуры происходил по экспоненциальному закону. На глубине 5 см во всех образцах зависимость роста температуры от времени описывалась сигмоидальной функцией Больцмана. Предложенная методика может использоваться для оценки пожароопасных свойств пористых материалов, в частности, систем почва-нефтепродукты на объектах нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: тлеющее горение, пористые системы, нефтепродукты, пожарная опасность

TECHNIQUE OF ASSESSMENT OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE SMOLDERING COMBUSTION IN POROUS SOIL SYSTEMS ON OIL AND GAS OBJECTS

M.I. Zaykina; A.P. Reshetov; V.Ya. Trofimets.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

In work the technique of the experimental assessment of thermodynamic characteristics of a condition of porous soil system at external thermal heating is offered. On a surface of all studied exemplars body height of temperature happened under the exponential law. At a depth of 5 cm in all exemplars dependence of body height of temperature on time was described by sigmoidal function of Boltzmann. The offered technique can be used for assessment of fire-dangerous properties of sponges, in particular systems the soil – oil products on objects of an oil and gas complex.

Keywords: smoldering combustion, porous systems, oil products, fire hazard

Попадая в природную среду, нефтепродукты далеко не всегда оказываются выделенными в отдельную фазу, а могут образовывать единую систему с вмещающей средой, в частности, с почвой [1, 2]. Почва сама по себе представляет собой сложную органоминеральную гетерогенную пористую систему, находящуюся в состоянии постоянного обмена веществом и энергией с контактирующими с ними объектами живой и неживой природы. Еще более сложной системой становится почва, содержащая инородные нефтепродукты [3]. Почва, содержащая определенное количество нефти или нефтепродукта, может представлять пожарную опасность. Такая ситуация часто складывается на объектах нефтегазового комплекса. В работах [4, 5] рассмотрена возможность возникновения пожароопасных ситуаций при разлинии нефтепродуктов в почвенный слой и экспериментально установлены концентрации нефтепродуктов в почвах, при которых системы почва-нефтепродукт способны к зажиганию. Важной пожароопасной

характеристикой систем почва-нефтепродукты на объектах нефтегазового комплекса является скорость роста температуры в данных системах под воздействием внешнего излучения. Выяснению динамики роста температуры на поверхности и в глубине почвенного слоя посвящена данная работа.

Для оценки термодинамических характеристик тлеющего горения в пористых системах была сконструирована лабораторная установка [6]. В данной установке внешний тепловой нагрев образца осуществляется от электрических нагревателей, расположенных над поверхностью образца. Первоначально эксперименты проводились с различными типами почв без нефтепродуктов. Затем эксперименты повторялись с почвами, пропитанными нефтепродуктом в соотношении 2 см^3 нефтепродукта на 200 г почвы каждого типа. Температура нагревателей устанавливалась $240 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура почвы измеряется при помощи двух термопар (на глубине 5 см и на поверхности) помещенных непосредственно в почву. Испытывались два типа почв – песчанистая супесь и суглинок. На рис. 1, 2 показаны примеры регрессионных зависимостей роста температуры на поверхности и в глубине образцов.

На поверхности всех изученных образцов рост температуры происходил по экспоненциальному закону. Так, в чистом песчанистом образце функция имела вид (рис. 1):

$$y = 164 - 147 \exp(-0,2x)$$

при достоверности аппроксимации $R^2=0,98$.

Максимальное расчетное значение температуры на поверхности песчаного образца равно $164 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальное экспериментально зафиксированное значение составило $169 \text{ }^\circ\text{C}$. К 21 мин эксперимента температура поверхности образца достигает значений близких к максимальной, то есть температура поверхности практически стабилизируется.

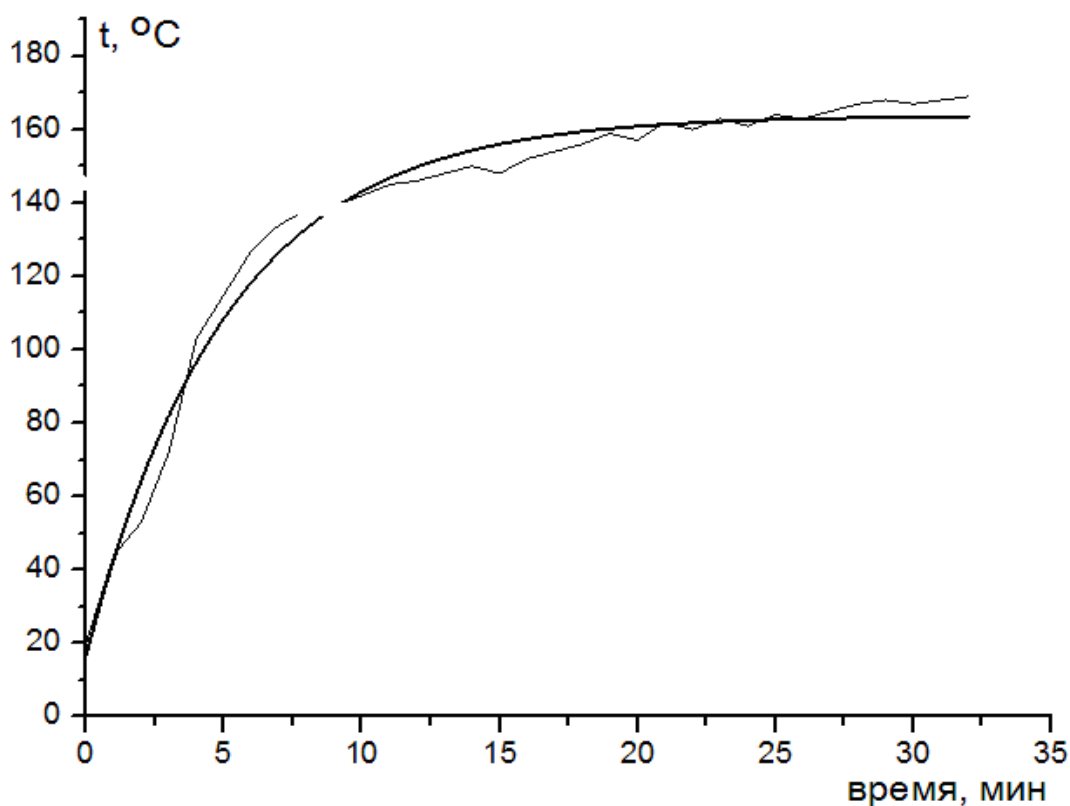


Рис. 1. Динамика изменения температуры на поверхности песчанистого образца без привнесения нефтепродукта

На глубине 5 см во всех образцах зависимость роста температуры от времени описывалась сигмоидальной функцией Больцмана:

$$y = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{1 + \frac{\exp(\tau - \tau_k)}{b}}$$

где t_1 и t_2 – соответственно нижняя и верхняя асимптоты, °С; $A_t = t_2 - t_1$ – амплитуда, °С; τ_k – точка перегиба функции (критическое состояние системы), мин.

В точке перегиба значение функции $y_k = t_1 + \frac{A_t}{2}$, °С.

Так в чистом песчаном образце функция имела вид, представленный на рис. 2, со следующими коэффициентами регрессионной зависимости: $t_1 = 20$ °С; $t_2 = 79$ °С; $\tau_k = 14,6$ мин; при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

Значение функции в точке перегиба равно $y_k = 49,5$ °С.

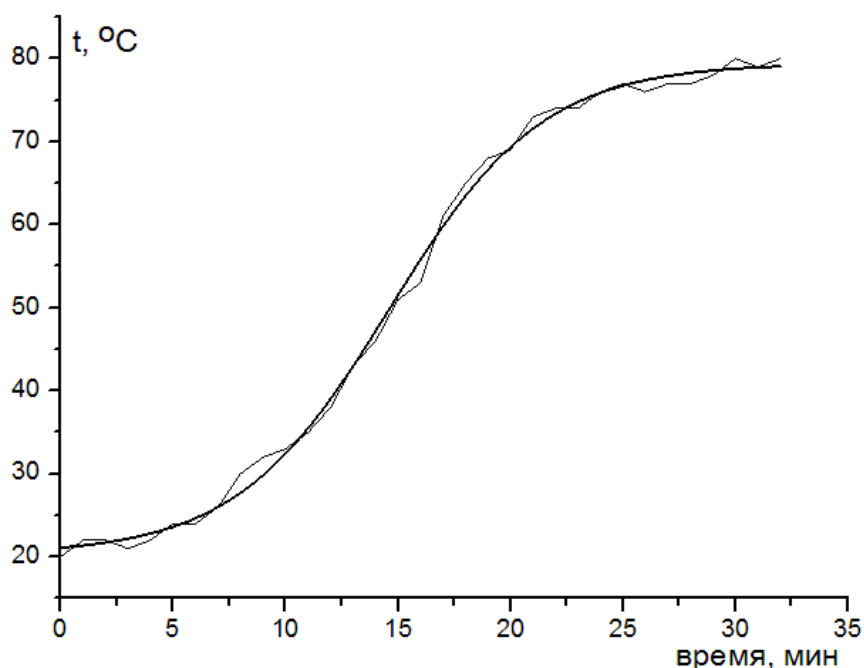


Рис. 2. Динамика изменения температуры в песчаном образце на глубине 5 см без привнесения нефтепродукта

Физический смысл точки перегиба функции заключается в смене динамики подъема температуры. До точки перегиба рост температуры идет по возрастающей положительной экспоненте, после точки перегиба – по возрастающей отрицательной экспоненте. На глубине 5 см в песчаном образце температура близкая к максимальной достигается примерно к 24 мин эксперимента.

На рис. 3 показана зависимость изменения разницы температур между поверхностным слоем чистого песчаного образца и слоем на глубине 5 см в ходе эксперимента:

$$\Delta t = t_{\text{пов.}} - t_{\text{глуб.}}$$

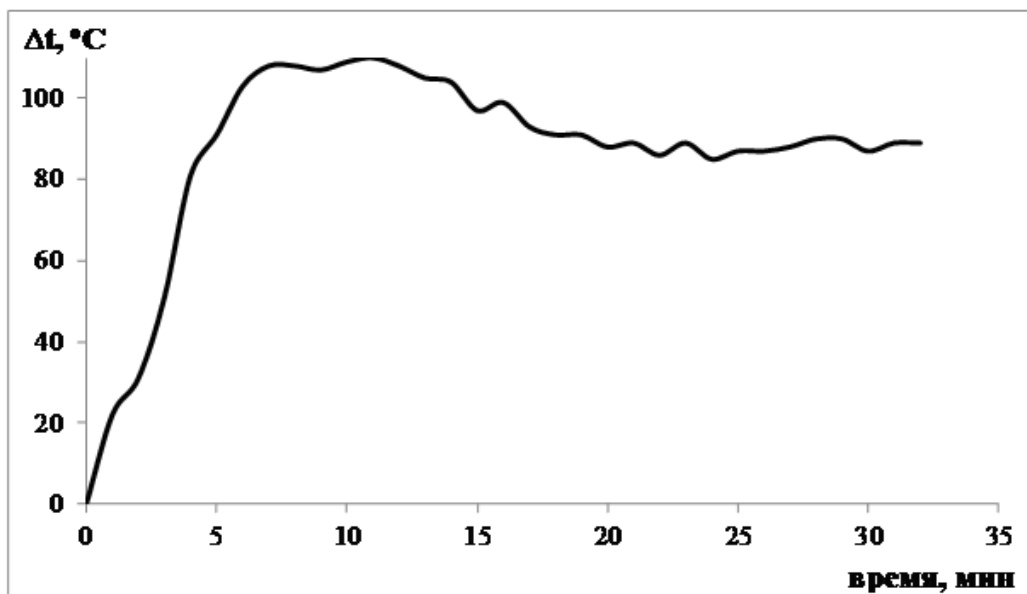


Рис. 3. Динамика изменения разницы температур между поверхностным слоем чистого песчанистого образца и слоем на глубине 5 см

Темп роста температуры на поверхности чистого песчанистого образца опережает скорость роста температуры этого образца на глубине 5 см. Это особенно проявляется на начальном этапе прогрева. Примерно от 7 и до 12 мин прогрева разница между указанными температурами составляет около 110 °C. Затем эта разница немного снижается и после 20 мин стабилизируется на уровне около 90 °C.

В настоящей работе предложена методика экспериментальной оценки термодинамических характеристик состояния пористой почвенной системы при внешнем тепловом нагреве. Методика включает определение следующих характеристик:

- максимальная температура на поверхности образца;
- время достижения максимальной температуры поверхности образца;
- функциональный закон, по которому меняется температура поверхности образца;
- максимальная температура в глубине образца;
- время достижения максимальной температуры в глубине образца;
- функциональный закон, по которому меняется температура в глубине образца;
- критическая температура в глубине образца, при которой изменяются динамические характеристики роста температуры;
- время, соответствующее критической температуре в глубине образца;
- динамика изменения разницы температур между поверхностью образца и в глубине образца.

Аналогичные термодинамические характеристики состояния системы при внешнем тепловом нагреве были определены для чистого глинистого образца, а также для образцов, пропитанных нефтепродуктом (НП) (табл. 1, 2).

Таблица 1. Термодинамические характеристики на поверхности пористой почвенной системы при внешнем тепловом нагреве

Тип почвы		Поверхность					
		$t_{10 \text{ мин.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{20 \text{ мин.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{max расч.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{max.}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{max.}}, \text{мин}$	$t=F(\tau)$
Песчанистая	Чистый	142	157	164	169	≈21	exp
	С НП	169	188	193	198	≈21	exp
Глинистая	Чистый	127	134	134	138	≈17	exp
	С НП	161	168	169	172	≈16	exp

Таблица 2. Термодинамические характеристики в глубине пористой почвенной системы при внешнем тепловом нагреве

Тип почвы		Глубина 5 см				
		$t_{\text{крит.}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{крит.}}, \text{мин}$	$t_{\text{max.}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{max.}}, \text{мин}$	$t=F(\tau)$
Песчанистая	Чистый	49,5	14,6	79	≈24	Boltzman
	С НП	38,5	17	95	≈29	Boltzman
Глинистая	Чистый	43,5	6,7	73	≈19	Boltzman
	С НП	44	7	77	≈24	Boltzman

Таким образом, в глубине чистого глинистого образца также, как и в песчанистом образце, время наступления критического значения температуры близко ко времени выравнивания температуры на поверхности данного образца.

Динамика изменения разницы температур между поверхностью образца и слоем на глубине 5 см в глинистом образце приведена на рис. 4. Здесь максимальная разница между температурами поверхности и в глубине образца достигается на 7 мин и составляет примерно 90 °С. К 12 мин эта разница выравнивается и составляет примерно 55÷60 °С.

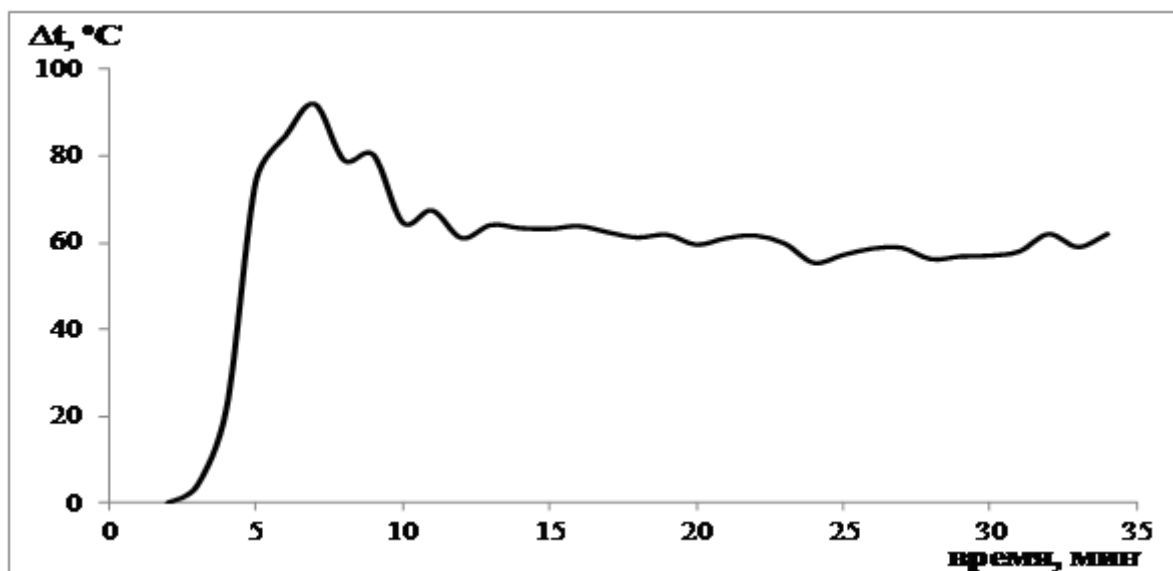


Рис. 4. Динамика изменения разницы температур между поверхностным слоем глинистого образца и слоем на глубине 5 см

Во второй серии экспериментов определялись термодинамические характеристики почвенных систем с занесенными в них нефтепродуктами при внешнем тепловом нагреве. В качестве нефтепродукта использовалось дизельное топливо. Термодинамические характеристики, полученные в результате данных экспериментов, приведены в табл. 1, 2.

Максимальное расчетное значение температуры на поверхности песчаного образца равно 193 °С. Максимальное экспериментально зафиксированное значение составило 198 °С. Выравнивание температуры на поверхности песчаного образца, загрязненного дизельным топливом, происходит примерно к 21 мин эксперимента. Максимальная температура при этом выше, чем в чистом песке примерно на 30 градусов. Видимо это происходит из-за разогрева нефтепродукта за счет термоокислительных процессов.

Скорость нарастания температуры в глубине песчаного образца с дизельным топливом заметно ниже, чем в образце чистого песка. Максимальная температура

достигается только к 29–30 мин, однако к концу эксперимента максимальная температура на глубине 5 см достигает значения 95 °С, что выше, чем в образце чистого песка примерно на 15 градусов.

Максимальная разница между температурами на поверхности и в глубине образца песка с дизельным топливом достигается на 12 мин и составляет 145 градусов. После этого разница между температурами поверхности и глубинным слоем в данном образце постепенно уменьшается, стабилизируясь только к концу эксперимента на уровне 100 °С.

Аналогичные данные получены для образцов глинистой почвы, загрязненной нефтепродуктом. В табл. 3 приведены сводные данные по динамике изменения разницы температур между поверхностным слоем изученных образцов и слоем на глубине 5 см.

Таблица 3. Динамика изменения разницы температур между поверхностным слоем и слоем на глубине 5 см изученных образцов

Тип грунта	Δt_{\max} , °С	$\tau_{\Delta t_{\max}}$, МИН	$\Delta t_{\text{стаб}}$, °С	$\tau_{\Delta t_{\text{стаб}}}$, МИН
Песок	110	7	90	20
Песок с НП	145	12	100	30
Глина	90	7	55	12
Глина с НП	103	5	97	8

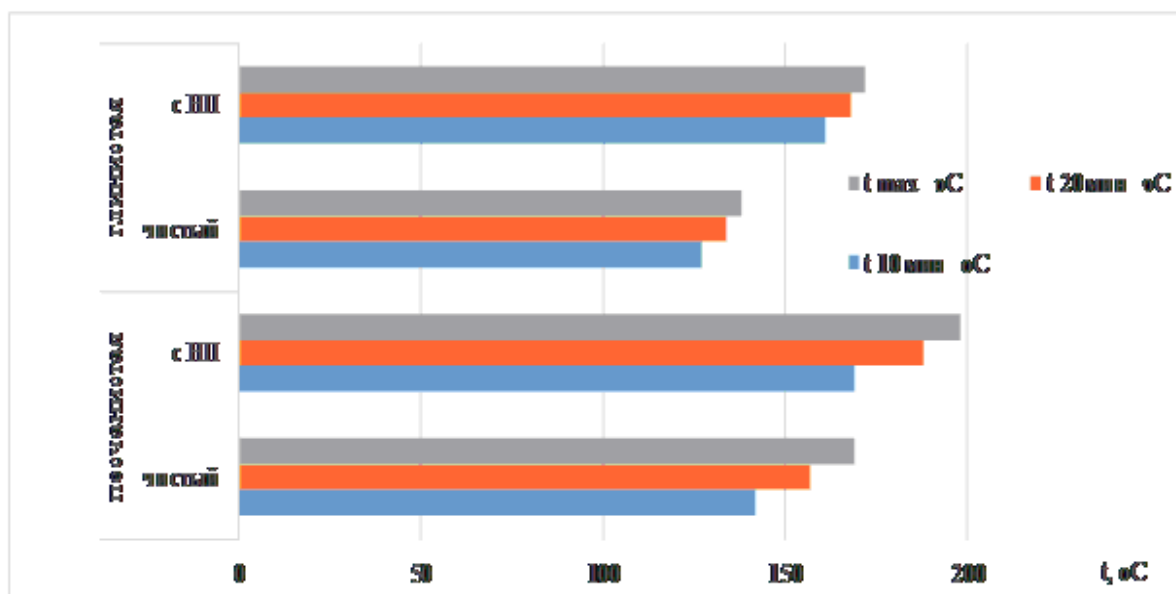


Рис. 5. Динамика роста температуры на поверхности образцов

На рис. 5, 6 данные по динамике роста температуры на поверхности и в глубине изученных образцов приведены в графическом виде. Эксперименты показали, что содержание в почвенном слое нефтепродукта увеличивает динамику разогрева образцов. Скорость подъема температуры на поверхности образцов, содержащих дизельное топливо, примерно в 1,2–1,3 раза выше, чем на поверхности чистых образцов.

Разогрев поверхностного слоя почвы происходит по экспоненциальной зависимости. Время достижения максимальной температуры не зависит от наличия в образцах нефтепродукта и составляет для песчаных образцов около 21 мин, для глинистых образцов – 16–17 мин.

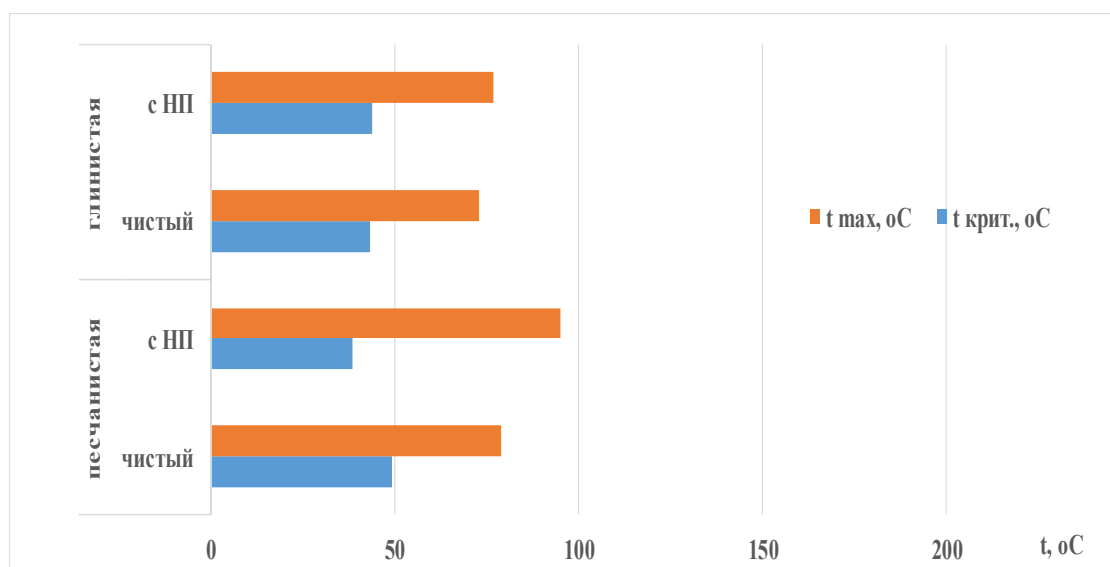


Рис. 6. Динамика роста температуры в образцах на глубине 5 см

На глубине 5 см динамика роста температуры в глинистом образце, содержащем нефтепродукт, очень незначительно превышает таковую в чистом глинистом образце. В песчаном образце, содержащем дизельное топливо, разогрев на глубине 5 см происходит заметно интенсивнее, чем в чистом образце.

Разогрев слоя почвы на глубине 5 см происходит по сигмоидальной зависимости. Время достижения максимальной температуры в песчаном образце больше, чем в глинистом. Рост температуры в образцах с дизельным топливом происходит дольше, чем в чистых образцах и достигает больших значений.

В целом предлагаемая методика позволяет изучать динамику температурных изменений в пористых материалах, в том числе в материалах, содержащих инородные нефтепродукты. Полученные результаты могут служить основой для оценки пожароопасных свойств пористых материалов, в частности, систем почва-нефтепродукты на объектах нефтегазового комплекса.

Литература

1. Джиошвили О.А., Рубилов С.Н., Галишев М.А. Экспериментальное исследование влияния физических свойств почвенных отложений на их нефтенасыщение при анализе чрезвычайных ситуаций в северных регионах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2012. № 1. С. 16–24.
2. Рубилов С.Н., Галишев М.А., Моторыгин Ю.Д. Системное описание нефтяного загрязнения почвенных отложений с использованием перколяционных моделей // Технологии техносферной безопасности. 2013. Вып. 6 (52).
3. Ожегов Э.А., Дементьев Ф.А., Ловчиков В.А. Люминесцентные характеристики экстрактов полиядерных ароматических углеводородов для идентификации нефти // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 5.
4. Нерубенко А.С., Галишев М.А., Ловчиков В.А. О пожарной опасности аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Технологии техносферной безопасности. 2016. Вып. 3 (67).
5. Галишев М.А. Исследование пожарной опасности почвенных систем при разливе в них нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 9. С. 38–45.
6. Зайкина М.И., Дементьев Ф.А., Алексеев А.С. Экспериментальная установка для изучения динамики роста температуры при различных режимах горения пористых материалов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 1. С. 37–44.

References

1. Dzhioshvili O.A., Rubilov S.N., Galishev M.A. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya fizicheskikh svoystv pochvennykh otlozhenij na ih neftenasysyshchenie pri analize chrezvychajnykh situacij v severnykh regionah // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2012. № 1. S. 16–24.
2. Rubilov S.N., Galishev M.A., Motorygin Yu.D. Sistemnoe opisanie neftyanogo zagryazneniya pochvennykh otlozhenij s ispol'zovaniem perkolyacionnykh modelej // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2013. Vyp. 6 (52).
3. Ozhegov Eh.A., Dement'ev F.A., Lovchikov V.A. Lyuminescentnyye harakteristiki ehkstraktov poliyadernykh aromaticeskikh uglevodorodov dlya identifikacii nefiti // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2013. № 5.
4. Nerubenko A.S., Galishev M.A., Lovchikov V.A. O pozharnoj opasnosti avarijnykh razlivov nefiti i nefteproduktov // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2016. Vyp. 3 (67).
5. Galishev M.A. Issledovanie pozharnoj opasnosti pochvennykh sistem pri razlitii v nih nefteproduktov // Pozharovzryvbezopasnost'. 2016. T. 25. № 9. S. 38–45.
6. Zajkina M.I., Dement'ev F.A., Alekseev A.S. Eksperimental'naya ustanovka dlya izucheniya dinamiki rosta temperatury pri razlichnykh rezhimakh goreniya poristykh materialov // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2016. № 1. S. 37–44.