

УДК 662.995+536.242

НАКОРЧЕВСКИЙ А.И., НЕДБАЙЛО А.Н., БАСОК Б. И.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ

Надано співставлення експериментальних даних, що отримані на лабораторній установці по дослідженню нестационарного розповсюдження теплоти у пісчаному середовищі, з розрахунковими залежностями щодо акумулювання теплоти у необмеженому ґрунтовому масиві. Встановлено їх задовільну відповідність.

Представлено сопоставление экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке по исследованию нестационарного распространения теплоты в песчаной среде, с расчетными зависимостями по аккумулярованию теплоты в неограниченном грунтовом массиве. Установлено их удовлетворительное соответствие.

The presented collation experimental data, got on laboratory installation on study nonstationary spreading the heat in sandy ambience, with accounting dependency on accumulation heats in unlimited soil array. It is installed their satisfactory correspondence to.

$a_m$  — коэффициент температуропроводности засыпки;

$c_B, c_m$  — теплоемкости теплоносителя и засыпки;

$G_B$  — массовый расход теплоносителя;

$L$  — рабочая длина трубы;

$q_0$  — плотность теплового потока на наружной поверхности трубы;

$R$  — радиус распространения теплоты;

$R_0, R_{ст}$  — наружный и внутренний радиусы трубы-теплообменника;

$r$  — текущий радиус;

$\Delta r$  — смещение линейки относительно центральной оси модуля;

$T_{в.н}, T_0, T_m$  — температуры, соответственно, теплоносителя на входе в модуль, наружной поверхности трубы и песка при  $r > R$ , К;

$t$  — время;

$\alpha_{ст}$  — коэффициент теплоотдачи на внутренней стенке трубы;

$\lambda_{ст}, \lambda_m$  — коэффициенты теплопроводности стенки трубы и засыпки;

$\rho_m$  — плотность засыпки.

### **Введение**

Несмотря на то, что большинство задач теплопроводности относится к одному из разделов математической физики, некоторые из этих задач, особенно в нестационарной постановке, не имеют аналитических решений, удовлетворяющих физически реальным и практически значимым краевым условиям. К такой категории относятся задачи длительного сезонного аккумулярования теплоты в неограниченном грунтовом массиве с помощью разнообразных теплообменных систем с последующим извлечением теплоты. Они характеризуются изменяющимися во времени плотностью теплового потока, температурой теп-

лоносителя, возникновением регулярных разрывов этих функций при прекращении и возобновлении аккумулярования, гидравлической и тепловой инерционностью, обусловленной большой протяженностью тепловых сетей и малой скоростью движения теплоносителя. Прямое численное решение таких четырехмерных (пространство и время) задач обречено на неудачу по ряду причин. Одна из них состоит в том, что на сравнительно малых расстояниях от теплообменной системы (порядка 8 — 10 м) градиенты температур малы. Опыт численного решения задач математической физики, даже в случае использования широко апробированных процедур типа Рунге — Кутты и им подобных, точность которых

намного выше точности традиционных разностных схем, свидетельствует о том, что происходит “обнуление” производных при градиентах функций порядка  $10^{-7}$  и меньше, если не принять специальных мер. Поэтому проблематично использование разностных аналогов для решения задач такого вида. В связи с вышеизложенным в работах [1 – 3] предложены математические модели задач нестационарной теплопроводности в неограниченных грунтовых массивах при реально возможных краевых условиях. Решения на основе моделей сопоставлялись с классическими решениями и установлено их удовлетворительное соответствие. Однако постановка известных классических задач ограничена простыми исходными условиями (пространственная одномерность, постоянство определяющих параметров). В этой связи было принято решение об экспериментальной проверке адекватности основных положений моделей при условиях, близких к реальным.

### **Особенность задачи**

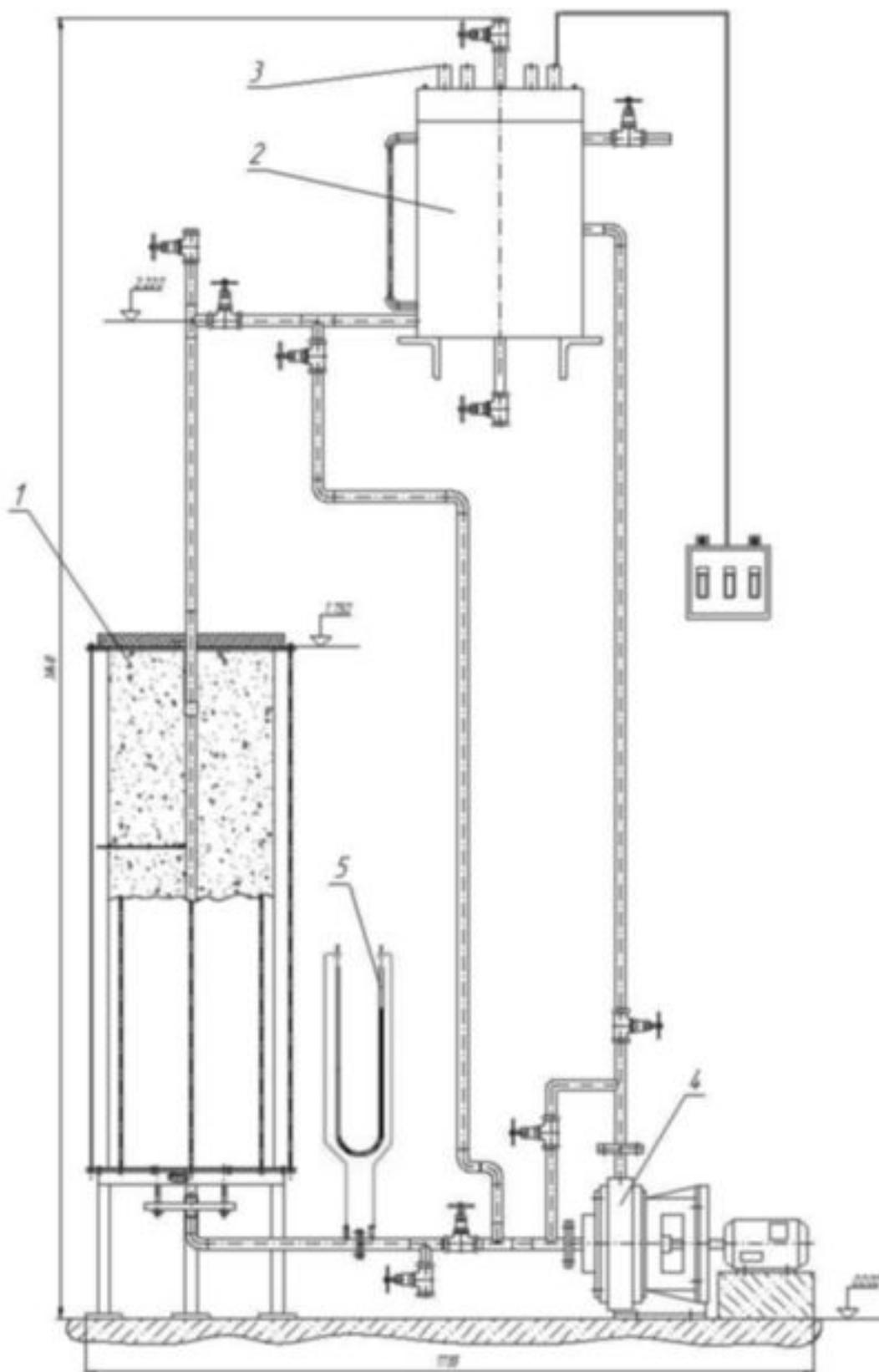
Сезонное аккумулирование теплоты, получаемой, например, от солнечных коллекторов в теплое время года, обычно осуществляется системой грунтовых вертикальных теплообменников коаксиального или U-образного исполнения, располагаемых в буровых скважинах длиной 50 – 150 м. Промежуточным теплоносителем служит вода. Контакт опускной и подъемной ветвей теплоносителя приводит к существенному выравниванию расчетной температуры по высоте теплообменника, что предопределяет преимущественно радиальное распространение теплоты. Этому способствует и малый темп увеличения температуры грунтового массива ( $\Delta t = 40...50$  К за 180 дней). Особенность предложенной теоретической модели состоит во введении конечного радиуса  $R$  распространения теплоты в неограниченном массиве, что удобно с инженерной точки зрения. Расчеты установили, что происходит первоначально умеренное, а затем очень быстрое увеличение  $R(t)$ . Поэтому нецелесообразно делать экспериментальную установку большого размера, поскольку при любых конечных размерах установки начальные условия

для реального неограниченного грунтового массива  $T_M = \text{const}$  будут нарушены за малый промежуток времени  $\tau$  от начала аккумулирования.

Было принято решение ограничиться соблюдением в исследуемом модуле установки условия  $T_M = \text{const}$  при  $r > R$  за временной промежуток ее работы  $\tau \sim 300 \div 500$  с. Это определило радиус установки  $R_y = 200$  мм. В качестве теплообменного устройства использовалась прямая труба. Ее выбор обусловлен надежными зависимостями по теплопередаче для такой конструкции в случае, если рабочему участку трубы предшествует участок гидравлической и тепловой стабилизации потока. Рабочая высота модуля ( $H = 1250$  мм) должна обеспечить малую разность температур теплоносителя на входе и выходе (порядка 1К, что характерно для реального теплообменника) и преимущественно радиальное распространение теплоты. Минимизация теплового потока в осевом направлении модуля достигается и тепловой изоляцией его торцевых поверхностей. Кратковременность проведения эксперимента заставила максимально использовать электронные средства для фиксирования и обработки данных от измерительных устройств.

### **Экспериментальный комплекс**

Отмеченные выше данные были положены в основу при создании экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 1. Она состоит из исследуемого модуля 1, напорного бака воды 2 с электронагревателями 3, насоса 4, измерителя расхода теплоносителя 5. Элементы установки соединены трубопроводами и обводными линиями, позволяющими варьировать расход теплоносителя, поступающего в модуль 1. Исследуемый модуль (см. рис. 2) представляет собой вертикально ориентированную цилиндрическую емкость, заполненную мелкозернистым сухим речным песком с размером частиц основной (больше 60 % по гранулометрическому анализу) фракции 0,5 мм. По центру емкости проходит труба из нержавеющей стали ( $d = 25 \times 1,0$  мм), имитирующая грунтовый теплообменник. Торцы емкости теплоизолированы пенополиуретаном.



*Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки*

*1 – исследуемый модуль, 2 – напорный бак, 3 – электронагреватели, 4 – насос, 5 – измеритель расхода.*

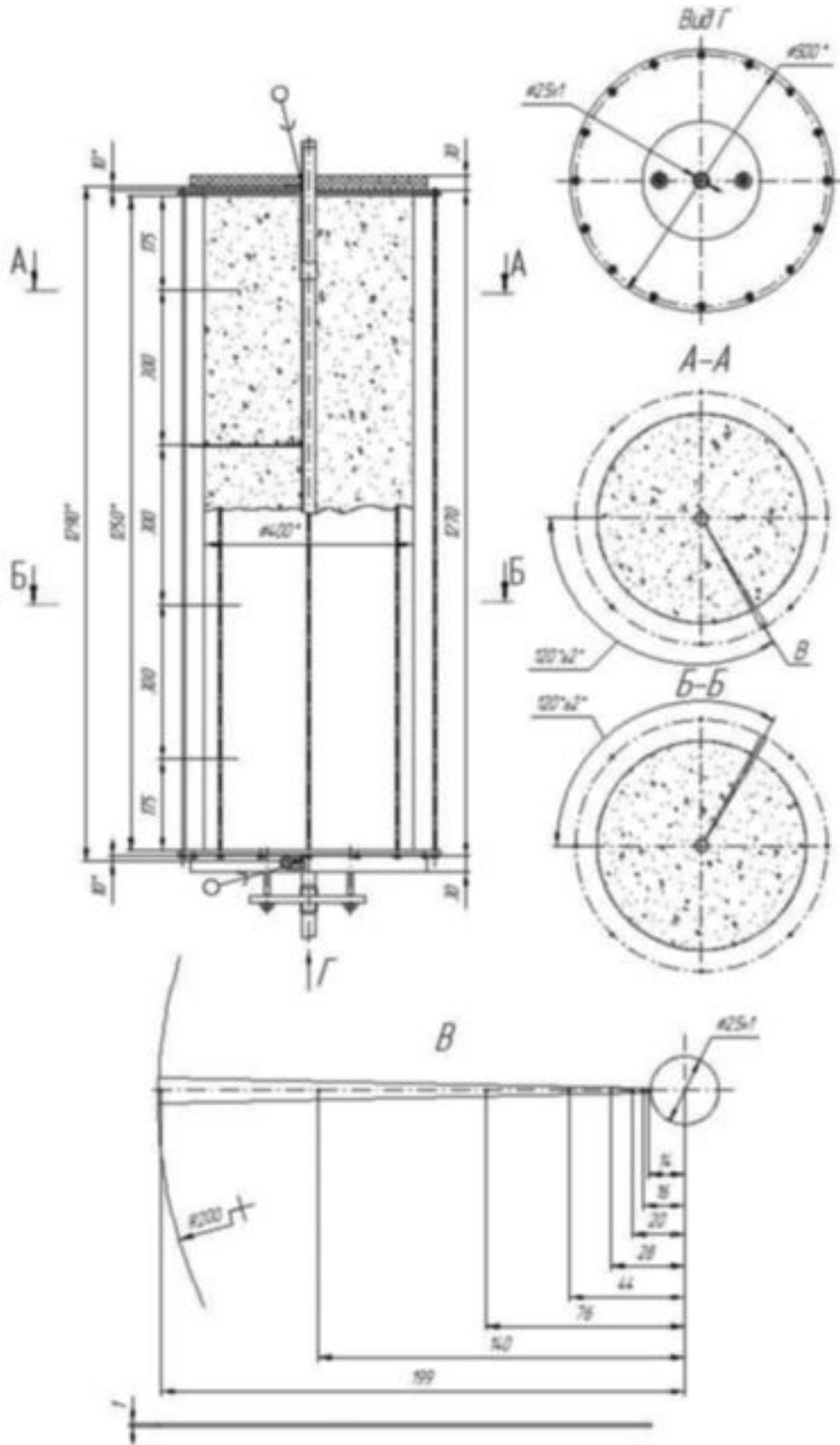


Рис. 2. Исследуемый модуль.

В четырех сечениях модуля (с шагом 300 мм) расположены радиально ориентированные “линейки” из плексигласа с закрепленными на них термопарами. “Линейки” заводились через монтажные отверстия в корпусе модуля по мере его засыпки песком и смещены в азимутальном направлении (см. рис. 2). Использовались хромель-копелевые термопары ХК(L) с диаметром рабочего спая 0,2 мм. Термоэлектрические преобразователи применялись и для измерения температур теплоносителя на выходе из напорного бака, на входе в модуль и на выходе из него.

Остановимся на особенностях монтажа термопар в песчаной засыпке модуля. Радиальное расположение термопар на “линейках” соответствовало размерам, указанным на рис. 2, с точностью  $\pm 0,1$  мм при условии плотного контакта наружной поверхности трубы с торцом “линейки”. Тесный контакт был обеспечен только для верхней “линейки”. Расположенные ниже “линейки” оказались смещенными относительно центра модуля на  $\Delta r$  соответственно +1,5; +1,5; +0,5 мм (точность измерений 0,5 мм). Во избежание влияния материала “линейки” на показания термопар их рабочие спаи возвышались над “линейкой” на 5 мм. При засыпке “линейек” песком неизбежны микроперемещения рабочих спаев. Если учесть и то, что измерения температур проводятся в дисперсной среде с размерами частиц порядка размера рабочего спая, то расположение точек фактической регистрации температур окажется несколько иным, чем по расчету. При определении координат этих точек считалась допустимой корректировка расчетных расстояний не более чем на 5 % по результатам пробного испытания установки и их сравнения с расчетными данными согласно модели [1 – 3]. В результате анализа приняты следующие координаты первых трех точек от оси модуля: 14,2; 15,9; 19,0 мм для верхней “линейки”; 15,5; 17,3; 22,0 мм для второй “линейки” от верха; 15,5; 17,3; 20,5 мм – для третьей от верха; 14,7; 15,9; 20,5 мм – для нижней. Средний процент абсолютных значений корректировок этих 12 расстояний оказался равным 1,8 %. Уточнение координат точек, удаленных от центра модуля на 28 мм и больше, проводилось только с учетом указанного выше смещения “линейек”  $\Delta r$ .

Последующее изменение размеров на величину порядка 0,1 мм здесь нерезультативно из-за пологого характера изменения температур на таких расстояниях.

Регистрация температур в объеме засыпки и теплоносителя осуществлялась с использованием автоматизированного комплекса. Для повышения точности измерения перепада температур теплоносителя на входе и выходе из модуля применялась дифференциальная схема. Защита от электромагнитных помех достигалась экранированием проводов и изготовлением витой пары термоэлектродов. Сигналы от термопар обрабатывались аппаратно-программным комплексом (АПК) на основе быстродействующей многоканальной компьютерной платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), позволяющего производить измерения низковольтных сигналов от унифицированных термопреобразователей различных типов согласно существующим стандартам. В качестве компьютерной платы использовалось серийно выпускаемое фирмой “Сатурн Дата Интернейшнл” изделие для шины ISA с гальванической развязкой и буферной памятью, которое предназначено для работы в операционных системах DOS, Windows 95, 98, 2000, XP с возможностью постоянной или периодической записи результатов измерений в файл, визуализацией и контролем тепловых параметров не более чем в 64 измеряемых каналах. Для повышения точности регистрации температур применялось как аппаратное усиление сигнала, так и программное умножение цифровых данных. Расчетная погрешность измерений  $\pm 0,5$  К.

Расход теплоносителя определялся по перепаду давлений на диафрагме, сужающей поток. Расходомерное устройство было протарировано объемным способом. Детальное описание экспериментальной установки и сведения об измерительном комплексе даны в [4, 5].

### **Расчетные соотношения**

Согласно [1–3] в цилиндрических координатах ( $r, t$ ) система уравнений, описывающих аккумуляцию теплоты в исследуемом модуле, следующая:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{q_0 (R - R_0)}{\lambda_m (T_0 - T_m)}, \\
 \frac{dT_0}{dt} &= a_m \frac{(T_0 - T_m)}{(R - R_0)^2} \cdot \begin{cases} A \left[ A - 1 - \frac{(R - R_0)}{R_0} \right] & \text{при } A > 4, \\ 6A - 12 - \frac{(R - R_0)A}{R_0} & \text{при } A \leq 4, \end{cases} \\
 \frac{dq_0}{dt} &= \frac{1}{rt} \left( \frac{dT_{\text{в.н.}}}{dt} - \frac{dT_0}{dt} \right), \quad rt = \frac{\pi R_0 L}{G_B c_B} + \frac{R_0}{\alpha_{\text{ст}} R_{\text{ст}}} + \frac{R_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_{\text{ст}}} \right)}{\lambda_{\text{ст}}}, \\
 \frac{dR}{dt} &= \frac{\frac{q_0 R_0}{\rho_m c_m} - a_3 c_1 \frac{dT_{\text{в.н.}}}{dt} - (a_1 + a_3 c_3) \frac{dT_0}{dt}}{(a_2 + a_3 c_2)}, \\
 c_1 &= \frac{A}{q_0 \cdot rt}, \quad c_2 = \frac{A}{(R - R_0)}, \quad c_3 = - \left( c_1 + \frac{A}{T_0 - T_m} \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где при  $A > 4$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (R - R_0) \left[ \frac{(R - R_0)}{(A + 1)(A + 2)} + \frac{R_0}{A + 1} \right], \\
 a_2 &= (T_0 - T_m) \left[ \frac{2(R - R_0)}{(A + 1)(A + 2)} + \frac{R_0}{A + 1} \right], \\
 a_3 &= -(T_0 - T_m)(R - R_0) \left[ \frac{(R - R_0)(2A + 3)}{(A^2 + 3A + 2)^2} + \frac{R_0}{(A + 1)^2} \right],
 \end{aligned} \tag{2}$$

при  $A = 4$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (R - R_0) [0,1R + 0,3R_0 - A(0,017R + 0,033R_0)], \\
 a_2 &= (T_0 - T_m) [0,2R + 0,2R_0 - A(0,034R + 0,016R_0)], \\
 a_3 &= -(T_0 - T_m)(R - R_0)(0,017R + 0,033R_0).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Распределение температур  $T$  в области  $r \in [R_0, R]$  находится согласно:

$$\begin{aligned}
 T &= T_m + (T_0 - T_m)(1 - \eta)^A \quad \text{при } A > 4, \\
 T &= T_m + (T_0 - T_m)(1 - \eta)^3 (1 + 3\eta - A\eta) \quad A \leq 4, \\
 \eta &= \frac{r - R_0}{R - R_0}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Как упоминалось выше, наличие участка стабилизации потока позволило находить  $\alpha_{\text{ст}}$  по известной формуле Б. С. Петухова [6]. Тогда при зафиксированных в опытах расходе теплоносителя  $G_B$  и температуре  $T_{\text{в.н.}}(t)$  система уравнений (1) – (3) оказывается замкнутой и сводится к задаче Коши, численное решение которой дает значения  $A(t)$ ,  $T_0(t)$ ,  $q_0(t)$ ,  $R(t)$ , а затем согласно (4) и

распределения  $T(r, t)$ . В процессе вычислений контролировалась точность интегрирования функций сопоставлением значений количеств введенной в модуль теплоты

$$E = \int_0^t 2\pi R_0 L q_0 dt$$

и аккумулятивной модулем теплоты, подсчитываемой по конечным значениям параметров:

$$E_k = 2\pi L \rho_m c_m (T_0 - T_m)(R - R_0) \times$$

$$\times \begin{cases} \frac{R - R_0}{(A+1)(A+2)} + \frac{R_0}{A+1} & \text{при } A > 4, \\ 0,1R + 0,3R_0 - A(0,017R + 0,033R_0) & \text{при } A \leq 4. \end{cases}$$

Допустимым считалась расхождение меньше 1 %.

Теплофизические свойства воды определялись по известным табличным значениям, а песчаной засыпки по специальным лабораторным исследованиям, что привело к результатам:  $\rho_m = 1540 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda_m = 0,38 \text{ Вт/(м·К)}$ ,  $c_m = 793 \text{ Дж/(кг·К)}$ .

### **Экспериментальные данные и их сопоставление с расчетными соотношениями**

Перед включением установки в работу проверялось ее тепловое равновесие сравнением показаний термопар в модуле. При разности показаний в пределах 1 К считалось выполняющимся условие  $T_m = \text{const}$ . Затем включались АПК с заданным шагом регистрации температур (обычно 5 или 10 с), нагреватели воды и насос. Такой режим соответствует начальному этапу грунтового аккумуляирования теплоты. Помимо такой схемы были проведены эксперименты и с предварительным нагревом воды в напорном баке. Расход теплоносителя поддерживался неизменным на протяжении опыта.

Согласно изложенному, во всех проведенных опытах фиксировались температуры песчаной засыпки в точках, отстоящих от оси модуля на расстояниях: 14,2; 14,7; 15,5; 15,9; 17,3; 19,0; 20,5; 22,0 мм, а также на расстояниях 28, 44, 76, 140, 199 мм (с добавлением поправок на смещение

“линеек”  $\Delta r$  для последних пяти значений). Суммарное число точек с синхронным измерением составило  $8 \times 4 + 3 = 35$ . Вычислялись и расчетные значения температур на этих расстояниях. Из-за малых различий между значениями  $T(r, t)$  и  $T(r + \Delta r, t)$  при  $r \geq 28$  мм на приведенных ниже графиках (рис. 3-7) нанесены температурные линии для расстояний по верхней “линейке” – 28, 44, 76 мм. Расчетные линии для температур на радиусах 140 и 199 мм практически совпадают с линией  $T_m = \text{const}$  и поэтому не приводятся. Порядковые номера линий температур на графиках соответствуют указанной выше последовательности радиусов (1 – 14,2 мм, 2 – 14,7 мм, ... , 10 – 44 мм, 11 – 76 мм). Опытные данные для каждой “линейки” оказались строго ранжированными по радиусу до  $r = 28$  мм включительно. Поэтому экспериментально зафиксированные температуры “линейки” обозначены общим условным знаком:  $\square$  – для верхней “линейки”,  $\diamond$  – для второй от верха,  $\triangle$  – для третьей, \* – для нижней. Для температур при  $r \geq (28 + \Delta r)$  характерно совпадение опытных данных всех “линеек”. Во избежание чрезмерного загромождения графиков здесь приводятся данные только для первой (с минимальным  $\Delta r = 0$  мм) и второй (с наибольшим  $\Delta r = 1,5$  мм) “линеек”. Причем для  $r = (28 + \Delta r)$  используются приведенные выше условные знаки, для  $r = (44 + \Delta r)$  – те же знаки, но зачерненные, для  $r = (76 + \Delta r)$  соответственно –  $\times$  и  $\square$ . Температуры на входе в модуль  $T_{в.н.}(t)$  обозначены  $\blacktriangle$ . Аппроксимация их значений, как отмечалось, служит замыкающим условием для системы уравнений (1) – (3).

Первая серия экспериментов, когда работа насоса и нагревателя воды начиналась одновременно, представлена опытами 1 (см. рис. 3) и 2 (см. рис. 4). “Замыкающие” экспериментальные данные  $T_{в.н.}(t)$  отвечают линейным зависимостям

$$T_{в.н.}(t) = T_{в.н.}(0) + k_T t,$$

где  $k_T = 0,0327 (0,051) \text{ }^\circ\text{C/с}$ . Расходы теплоносителя были:  $Q_b = 0,0825 (0,139) \text{ л/с}$ . В скобках указаны значения для опыта 2. Здесь и дальше на графиках номера расчетных кривых проставлены только для 1, 10, 11 линий. Кривые с номерами 2–9 соответствуют упорядоченной последовательности линий между 1 и 10. Если учесть, что

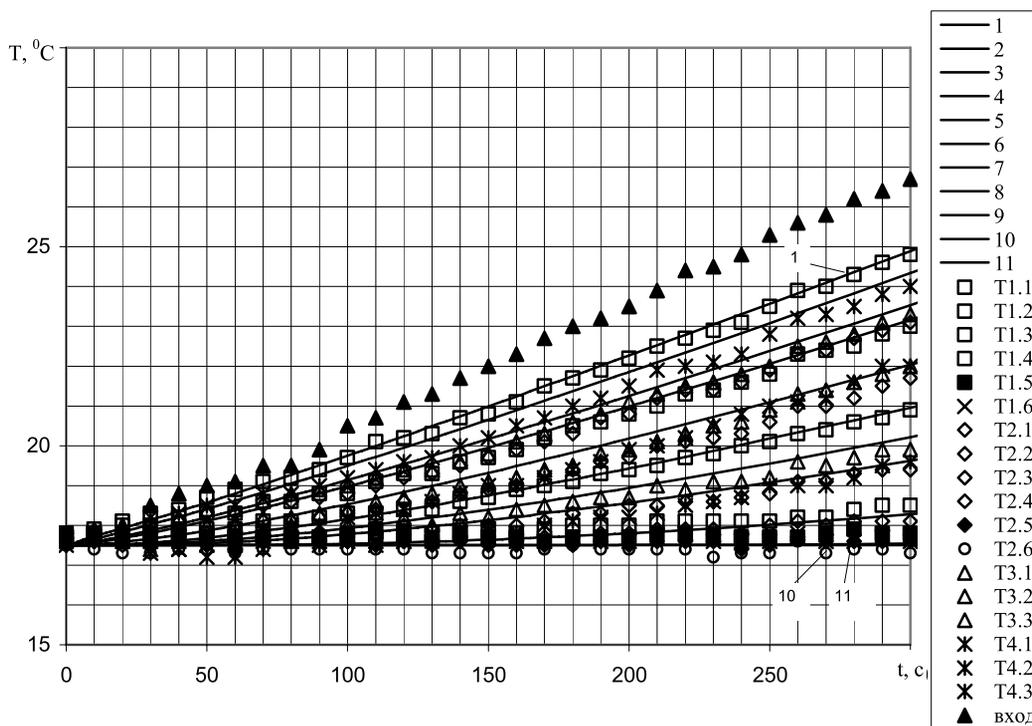


Рис. 3. Опыт 1. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) данных изменения температур.

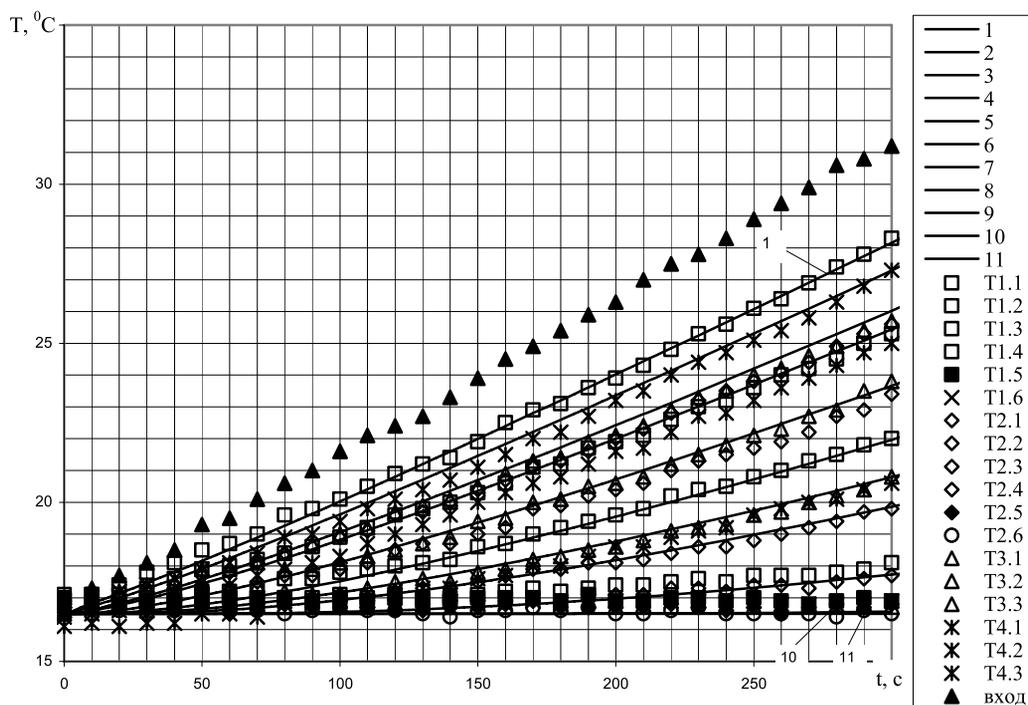


Рис. 4. Опыт 2. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) данных изменения температур.

вертикальный размер условных обозначений от их центра должен соответствовать величине исходной погрешности измерений  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , то соот-

ветствие теоретических и опытных данных вполне удовлетворительное. На графиках этой серии не представлено сопоставление показаний диф-

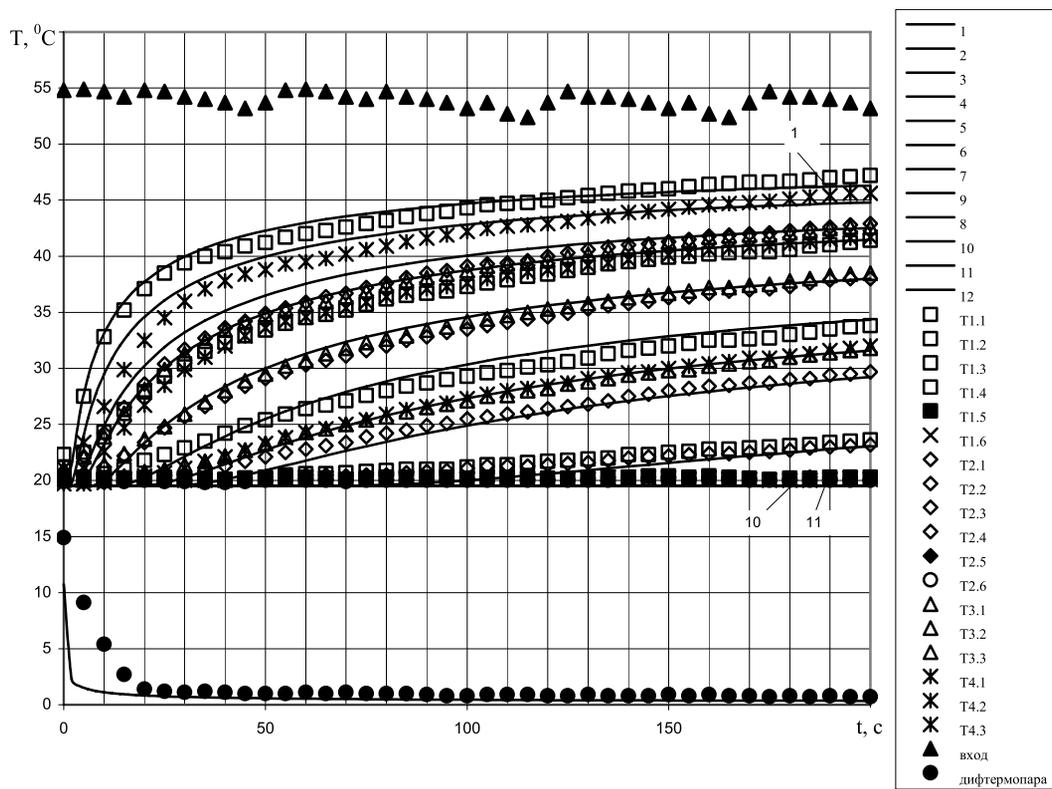


Рис. 5. Опыт 3. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) данных изменения температур.

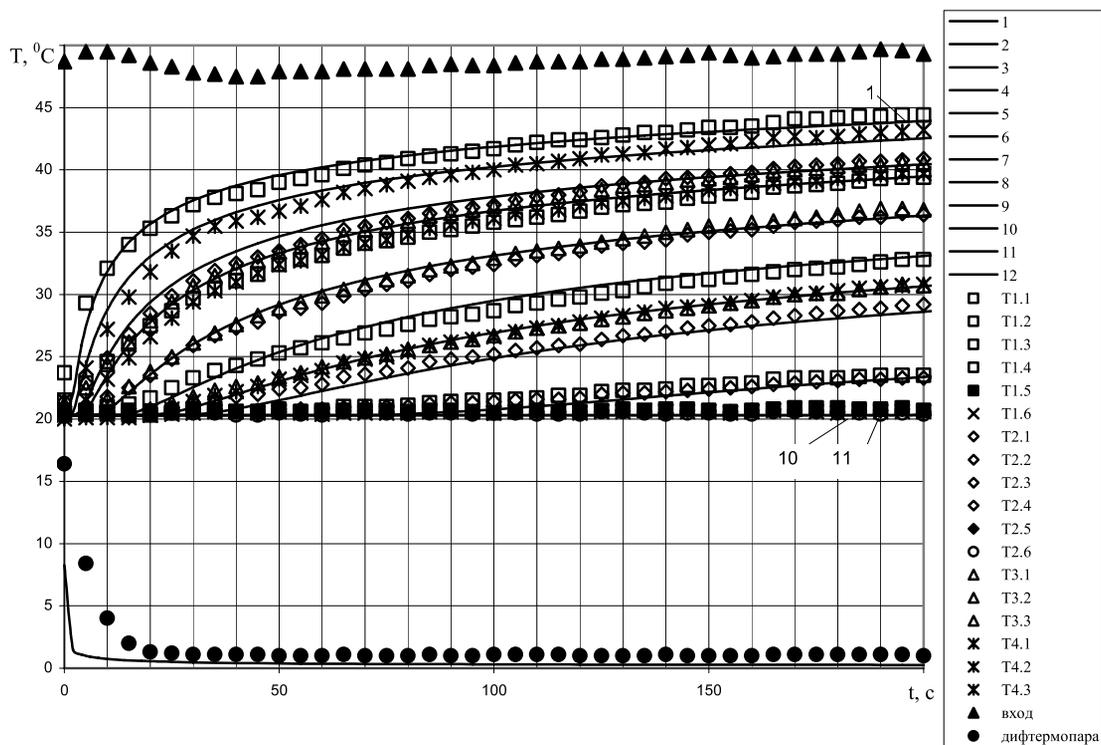


Рис. 6. Опыт 4. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) данных изменения температур.

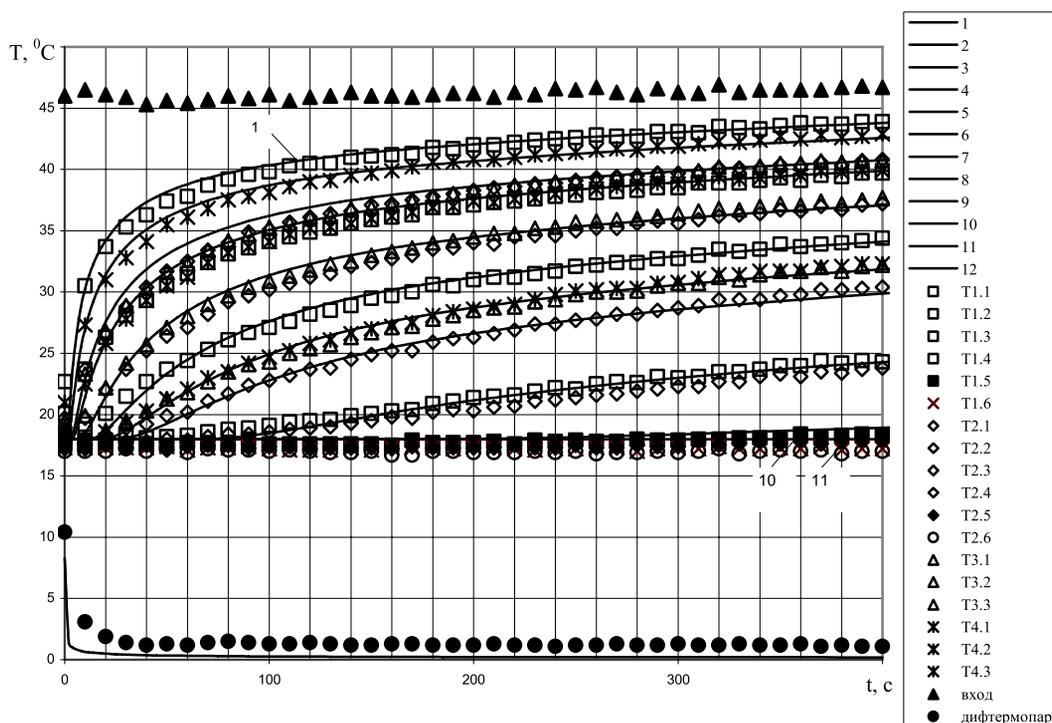


Рис. 7. Опыт 5. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) данных изменения температур.

ференциальных измерений разности температур на входе и выходе установки с расчетными из-за малости их значений (не более 1К). По этой причине можно констатировать только их условное соответствие. Ограничения временным интервалом в 300 с связано с тем, что расчетный радиус распространения теплоты достиг стенки экспериментального модуля на 325 с и 326 с от начала опытов 1 и 2.

Большой диапазон изменений температур естественен для опытов второй серии (с предварительным нагревом теплоносителя в расходной емкости). Хотя такой режим и не является основным при аккумулировании, но нестационарные эффекты здесь более четко выражены. Результаты сопоставления даны на рис. 5 – 7, где размер условных обозначений приближается к требуемому, хотя остается все же меньшим. Поэтому распределение опытных данных более четкое, чем в первой серии. Приведем значения объемных расходов для опытов 3 – 5: 0,091; 0,114; 0,134 л/с соответственно. Влияния эффекта начального вытеснения холодного теплоносителя горячим с разницей температур порядка 30...35 К в теплообменной трубе избежать не уда-

лось. И несмотря на это, даже на начальной стадии процесса корреляция опытных и расчетных данных вполне удовлетворительная. Если проанализировать всю совокупность распределения опытных точек этой серии, то можно отметить только частичную “ненагруженность” третьей линии с  $r = 15,5$  мм. Важно подчеркнуть соответствие опытных точек теоретическим данным для 9, 10 линий, что подтверждает допустимость введения понятия “конечный радиус распространения теплоты” в неограниченном массиве. Приходится отметить некорректность показаний дифференциального измерителя температур. Качественно его показания соответствуют расчетным, но количественно они не отвечают реальной тепловой нагрузке, вводимой в исследуемый модуль.

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются с расчетными данными согласно математическим моделям аккумулирования теплоты в неограниченных грунтовых массивах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г.* Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения// Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25 – № 3 – С. 42–50.  
 2. *Накорчевский А.И.* Динамика грунтового аккумулирования теплоты и выбор рациональных решений // ИФЖ. – 2004.–Т. 77. – № 4. – С. 10–19.  
 3. *Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г.* Моделирование аккумулирования–разряжения теплоты в неограниченном грунтовом массиве // Труды V Минского международного форума по тепломассообмену – 2004. – Т. 3 – доклад 21, С. 3–21.

4. *Недбайло А.Н.* Экспериментальная установка по исследованию грунтового аккумулирования теплоты// Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26 – № 6 – С. 182–183.

5. *Недбайло А.Н., Коломейко Д.А.* Автоматизированное измерение тепловых параметров различных энергетических объектов при помощи аппаратно-программного комплекса// Тезисы IV Международной конференции “Проблемы промышленной теплотехники”. – 2005. – С. 357–358.

6. *Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/* Под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина – 3-е изд. – М.: МЭИ, 2001 – 564 с.

*Получено 12.01.2006 г.*

УДК 662.76

**ЖЕЛЕЗНАЯ Т.А., ГЕЛЕТУХА Г.Г.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

Виконано аналіз сучасних технологій газифікації біомаси. Зібрано дані по існуючим у світі демонстраційним і комерційним газифікаторам, що виробляють теплову енергію. Показано, що газифікація біомаси з отриманням теплоти вже досягла комерційного рівня і є конкурентоспроможною з іншими технологіями. Представлено огляд сучасних науково-дослідних робіт, що проводяться у даній галузі. Ці роботи спрямовано як на розробку нових технологій газифікації біомаси, так і на вдосконалення і модернізацію відомих старих конструкцій газифікаторів. Розглянуто економічні аспекти роботи газифікаційних установок.

Выполнен анализ современных технологий газификации биомассы. Собраны данные по существующим в мире демонстрационным и коммерческим газификаторам, вырабатывающим тепловую энергию. Показано, что газификация биомассы с получением теплоты уже достигла коммерческого уровня и является конкурентоспособной с другими технологиями. Представлен обзор современных научно-исследовательских работ, проводимых в данной области, которые направлены как на разработку новых технологий газификации биомассы, так и на совершенствование и модернизацию известных старых конструкций газификаторов. Рассмотрены экономические аспекты работы газификационных установок.

Modern technologies for biomass gasification are analyzed. Data on existing in the world demonstration and commercial units for biomass gasification for heat production are collected. It is shown that biomass gasification for heat production has already reached commercial level and is competitive with other technologies. Review of research and development work in this area is presented. The work is directed at the development of new biomass gasification technologies as well as at improving and modernizing well known old constructions of gasifiers. Economic aspects of gasification units are considered.

БМ – биомасса;  
ВДГ – восходящее движение газа;  
ГГ – генераторный газ;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
КПД – коэффициент полезного действия;  
КС – кипящий слой;