

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ГРУНТОВОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ**

*Наведено результати числового аналізу теплових процесів у центральній зоні ґрунтового акумулятора теплоти.*

*Представлены результаты численного анализа тепловых процессов в центральной зоне ґрунтового аккумулятора теплоты.*

*There presented the results of the numerical analysis of the heat processes in the central zone soil accumulator of the heat.*

$a$  – коэффициент температуропроводности,  
 $c$  – теплоемкость ґрунта,  
 $E^m$  – энергия,  
 $e$  – удельная энергия,  
 $L$  – шаг,  
 $p$  – параметр,  
 $q$  – плотность теплового потока,  
 $R$  – радиус,  
 $T$  – температура,  
 $t$  – время,  
 $x, y, z$  – координаты,  
 $Z$  – высота теплообменника,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  
 $\rho$  – плотность.

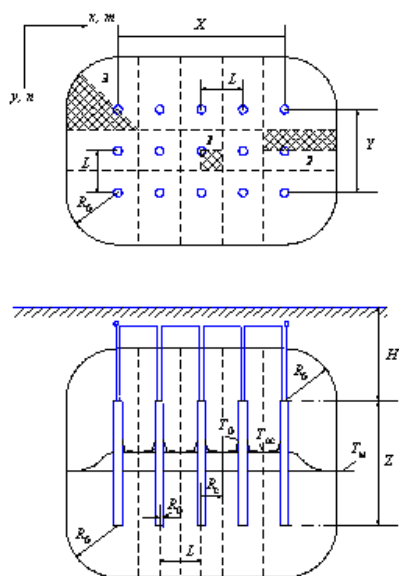
### **Индексы:**

0 – на наружной границе теплообменника,  
0,5 – при  $z = Z/2$ ,  
б – буфер,  
в – вода,  
к – конец,  
м – массив ґрунтовой,  
н – начало,  
ос – основной,  
 $z$  – по  $z$ ,  
 $\langle \rangle$  – знак осреднения.

Для проверки интегрального метода расчета ґрунтовых аккумуляторов теплоты [1] следует сопоставить результаты, полученные этим методом, с решением задачи другими способами. Наиболее достоверной была бы опытная проверка. Однако из-за больших габаритов аккумулятора и недостаточной точности измерительных средств такой способ окажется дорогим и ограниченно представительным. Другим способом проверки может быть прямой численный расчет, базирующийся на уравнении Био-Фурье. Но и здесь возникают проблемы, связанные с размерами объекта. Придется решать сеточные уравнения при числе контрольных объемов порядка  $10^{12}$  на временном интервале не менее четырех лет работы аккумулятора ( $1,24 \cdot 10^8$  с), что вряд ли реализуемо с помощью современных вычислительных средств. Единственный выход состоит в разбиении аккумулятора на зоны с последующей их типизацией по сходности протекания процессов. Здесь применен именно такой подход. При равномерной тепловой нагрузке, приходящейся на каждый внутренний теплообменник, и согла-

сованной с ней нагрузках периферийных теплообменников, поверхности раздела зон пройдут посередине шага  $L$  размещения теплообменников (штриховые линии на рис. 1). Градиент температур по нормали к этим поверхностям равен нулю, что предопределяет отсутствие теплообмена между зонами. Таким образом, типичными зонами ґрунтового аккумулятора будут три ее разновидности: а) центральная, б) периферийная боковая, в) периферийная угловая (рис. 1). В вертикальном направлении каждая из этих зон взаимодействует с внешним ґрунтовым массивом выше и ниже отметок верха и низа теплообменников. Для периферийных теплообменников необходимо учитывать эту особенность и в горизонтальных плоскостях.

При выборе способа решения сеточных уравнений пришлось отказаться от стандартных пакетных программ, например, типа «Phoenics». Практика пользования такими пакетами не позволила добиться необходимой в нашем случае строгой симметричности значений при решении физических задач, отвечающих этим условиям.



**Рис. 1. Разбивка грунтового аккумулятора на типичные зоны:**

**1 – центральная, 2 – боковая, 3 – угловая.**

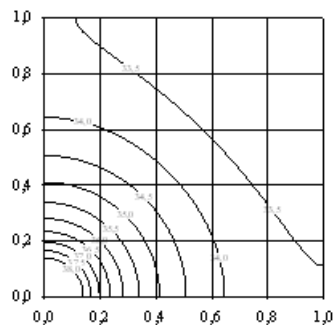
Поэтому пришлось ориентироваться на рекомендации в руководствах [2, 3]. В результате сопоставления различных разностных аналогов выбрана неявная схемы переменных направлений, позволившая увеличить полушаг по времени до 30...50 с и существенно сократить время вычислений по сравнению с явной схемой. Этим методом (в трактовке работы [3]) и выполнены численные расчеты. Причем, с целью уменьшения объема вычислений, расчетные области ограничены участками, равными площади  $\frac{1}{4}$  типичной центральной зоны и  $\frac{1}{2}$  типичных боковой и угловой зон (заштрихованные участки на рис. 1). Длина буферной подобласти распространения теплоты назначалась не менее ее значения по интегральному методу и контролировалась гарантированным выполнением на ее границе условия  $T = T_m$ . Теплофизические свойства грунта приняты здесь следующими:

$$\begin{aligned} \rho_M &= 1,84 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \\ c_M &= 1,15 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \\ \lambda_M &= 1,42 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \end{aligned}$$

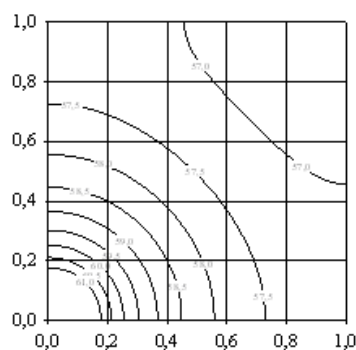
а размеры –  $L = 2,0$  м,  $R_0 = 0,1$  м. В связи с тем, что температура теплоносителя практически не изменяется по  $z$ , для анализа тепловых процессов в окрестности теплообменников можно ограничиться постановкой двумерных задач на плоскости  $x, y$ , а именно для  $\frac{1}{4}$  части типичной центральной зоны (см. рис. 1).

Результаты расчета представлены семей-

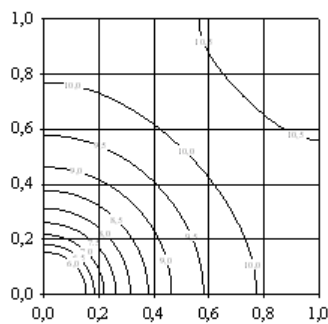
ством графиков на рис. 2, которые охватывают годовой цикл работы аккумулятора на 90, 180 и 360 сутки при неизменной плотности теплового потока как при аккумуляции, так и при разрядке:  $\langle q_0 \rangle = \pm 40,3$  Вт/м<sup>2</sup>. В левом нижнем углу расположена  $\frac{1}{4}$  часть сечения теплообменника с  $R_0 = 0,1$  м. Наружная поверхность четверти теплообменника аппроксимировалась ступенчатой линией с двадцатью разбиениями по каждому из направлений  $x, y$  с шагом 0,005 м.



**а**



**б**



**в**

**Рис. 2. Распределение температур в расчетной зоне на 90 (а), 180 (б) и 360 (в) сутки годового цикла.**

Расчетная область охватывает квадрат 1x1 м. Несмотря на то, что тепловой поток воспринимается прямоугольной областью, распространение теплоты имеет выражено радиальный характер. Только с приближением к диагонали квадрата изотермы уплощаются, а затем условия нулевого градиента температур на границах расчетной области «выворачивают» их в противоположную сторону. Численный расчет подтвердил принятое в [1] допущение, что основная часть энергии поглощается радиальной областью с  $R_{oc} = L/2$ , а затем и извлекается из нее. Подтверждена и независимость от времени разностей температур в области аккумуляирования–разрядки при  $q_0 = \text{const}$ , вследствие чего наблюдается устойчивая линейная упорядоченность интегральных характеристик годового цикла. Разность средней температуры на стенке теплообменника  $T_0$  и среднеинтегрального значения грунта  $T_{cp}$  аккумулятора составила 4,947 °С, а разность  $T_{cp}$  и  $T_{oc}$  оказалась 0,619 °С. Подчеркнем, что эти значения, вплоть до последней цифры, не изменялись при расчете всего годового цикла. Таким образом, при  $q_0 = \text{const}$  приращение (при аккумуляировании) или уменьшение (при разрядке) температур во времени происходит на одну и ту же величину во всей расчетной области, которая ограничена, по существу, кругом с  $R_{oc} = L/2$ . Тогда задача нахождения профиля температур сводится к решению уравнения:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} - \frac{p}{a_m} = 0, \quad (1)$$

где  $r \in [R_0, R_{oc}]$  при начальных условиях, отвечающих задаче Коши:

$$r = R_0: \quad T = T_0, \quad \frac{dT}{dr} = -\frac{q_0}{\lambda_m}, \quad (2)$$

Параметр  $p$  в (1) представляет собой производную от температуры по времени, которая, как отмечалось выше, неизменна на всей области определения задачи. Для ее нахождения следует воспользоваться формулой изменения среднеинтегральной температуры:

$$p = \frac{d\langle T \rangle}{dt} = \frac{0,5\pi R_0 \langle q_0 \rangle}{\rho_m c_m (R_{oc}^2 - 0,25\pi R_0^2)}, \quad (3)$$

Еще раз подчеркнем, что решение ищется при соблюдении условия  $\langle q_0 \rangle = \text{const}$ . После двукратного интегрирования (1) получена зависимость:

$$T = T_0 - \frac{pR_0^2}{4a_m} \left[ \frac{8}{\pi} \frac{R_{oc}^2}{R_0^2} \ln \left( \frac{r}{R_0} \right) - \frac{r^2}{R_0^2} + 1 \right], \quad (4)$$

Подстановкой  $T = T_{oc}$  при  $r = R_{oc}$  в (4) находится  $T_{oc}$ . Избыточное относительно  $T_{oc}$  энергосодержание, приходящееся на единицу высоты теплообменника, будет:

$$e_{из} = \rho_m c_m \int_{R_0}^{R_{oc}} 2\pi (T - T_{oc}) r dr = \frac{0,25\pi^2 R_{oc}^2}{R_{oc}^2 - 0,25\pi^2} \left[ \left( \frac{2}{\pi} - 0,25 \right) \bar{R}_{oc}^2 - \frac{0,25}{\bar{R}_{oc}^2} - \frac{0,25}{\pi} \ln \bar{R}_{oc} - \frac{2}{\pi} + 0,5 \right] \frac{\langle q_0 \rangle R_0^3}{a_m}, \quad (5)$$

где  $R_{oc} = R_{oc}/R_0$ . Имеем структурно простые зависимости, аналогичные полученным в [1]:

$$T_0 - T_{oc} = \varphi_1(\bar{R}_{oc}) \frac{\langle q_0 \rangle R_0}{\lambda_m}, \quad e_{из} = \varphi_2(\bar{R}_{oc}) \frac{\langle q_0 \rangle R_0^3}{a_m}. \quad (6)$$

Функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определяются только одним геометрическим параметром  $R_{oc}/R_0$ :

$$\varphi_1(\bar{R}_{oc}) = \frac{0,125\pi \left( \frac{8}{\pi} \bar{R}_{oc}^2 \ln \bar{R}_{oc} - \bar{R}_{oc}^2 + 1 \right)}{\bar{R}_{oc}^2 - 0,25\pi}, \quad (7)$$

$$\varphi_2(\bar{R}_{oc}) = \frac{0,25\pi^2 \bar{R}_{oc}^2 \left[ \bar{R}_{oc}^2 \left( \frac{2}{\pi} - 0,25 \right) - \frac{0,25}{\bar{R}_{oc}^2} - \frac{0,25}{\pi} \ln \bar{R}_{oc} - \frac{2}{\pi} + 0,5 \right]}{\bar{R}_{oc}^2 - 0,25\pi}.$$

Первая зависимость (7) примечательна тем, что устанавливает необходимый перепад температур ( $T_0 - T_{oc}$ ) для осуществления аккумуляирования или разрядки. Вычисленные по (4) значения  $T_{oc}$  не отличаются от результатов, полученных численным методом.

Теперь выявим влияние внешнего грунтового массива (буферной подобласти) на теплопередачу по высоте центральных теплообменников. Поскольку разность ( $T_0 - T_{oc}$ ) порядка 5...10 °С и основной перепад температур сосредоточен в малой окрестности теплообменников, эту задачу можно решать в одномерной постановке, ориентируясь на средние по сечению расчетной зоны температуры  $\langle T \rangle$ . При отсутствии теплового влияния атмосферы, что обеспечивается надлежащим выбором значения  $H$  (см. рис. 1), задача в вертикальном направлении  $z$  оказывается симметричной относительно середины высоты теплообменника, для которой принимаем  $z = 0$ . Поэтому можно ограничиться численным решением уравнения:

$$\rho_m c_m \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial z^2} + \frac{0,5\pi R_0 q_0}{R_c^2 - 0,25\pi R_0^2} \quad (8)$$

для этой половины высоты на протяжении нескольких лет работы аккумулятора. Можно принять, что на  $z \in [0, z_{0,5}]$ , где  $z_{0,5} = Z/2 = 50$  м, тем-

пература на стенке теплообменника  $T_0 = \text{const}$ , а начальная температура на всей области  $z$  равна температуре грунтового массива  $T_M = 10^\circ\text{C}$ . Для установления связи между  $q_0, \langle T \rangle, T_0$  воспользуемся (6), согласно которому:

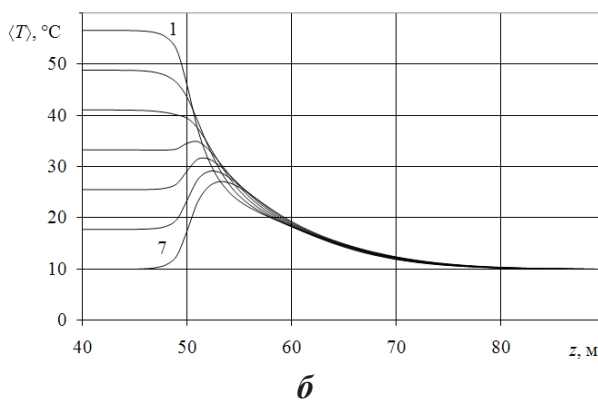
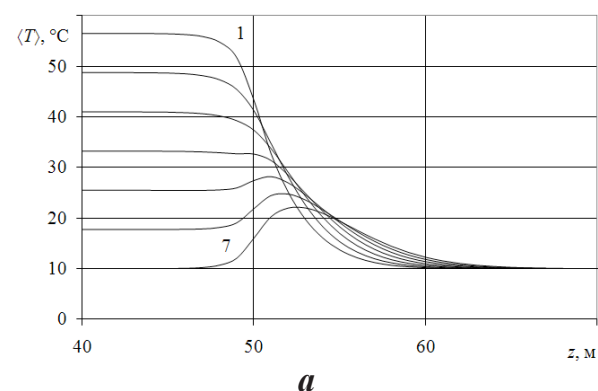
$$q_0 R_0 = \frac{\lambda_m (T_0 - \langle T \rangle)}{\varphi_1 - \frac{\varphi_2}{\pi(\bar{R}_c^2 - 1)}}, \quad \bar{R}_c = \frac{R_c}{R_0}. \quad (9)$$

Значения величин  $T_0(t)$  и  $\langle T \rangle(t, 0)$  принимались обеспечивающими  $q_0(t, 0) = 40 \text{ Вт/м}^2 = \text{const}$ . В течение полугода (180 суток) происходит аккумуляция, которое сменяется извлечением теплоты с такой же интенсивностью в течение второй половины года (180 суток).

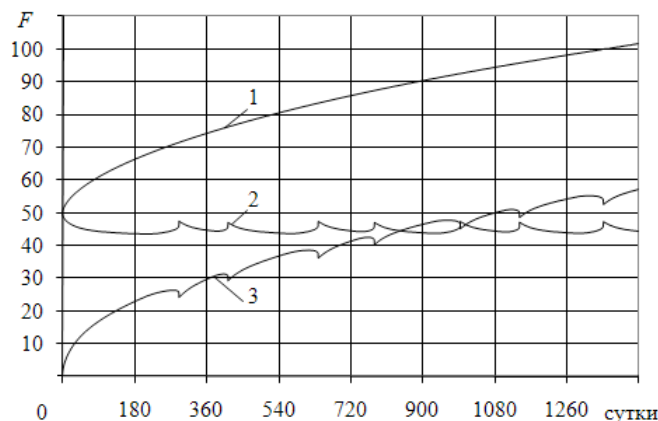
Результаты численного решения представлены графиками, отражающими непрерывную работу на протяжении второй половины первого и четвертого годов (рис. 3). Напомним, что отметка  $z = 50 \text{ м} = z_{0,5}$  соответствует границе непосредственного действия теплообменника, отделяющей основную область аккумуляции от буферной подобласти. Оказалось, что последняя имеет тенденцию проникновения в основную

область аккумуляции.

В качестве параметра, определяющего внешнюю границу буферной подобласти  $z_k(t)$ , принято условие отклонения  $\langle T \rangle$  от температуры грунтового массива  $T_M$  на  $0,001^\circ\text{C}$ . Внутренняя граница  $z_n(t)$  находилась по условию отклонения на это же значение от  $\langle T \rangle_0 = \langle T \rangle(t, 0)$ . По сути, разность  $Z_6 = (z_k - z_n)$  определяет эффективную условную длину буферной подобласти, распространяющейся по обе стороны от границы непосредственного действия теплообменников, а величины  $Z_{6,к} = (z_k - z_{0,5})$  и  $Z_{6,н} = (z_{0,5} - z_n)$  – соответственно условные внешнюю и внутреннюю ее протяженности. Зависимости  $Z_6(t), Z_{6,н}(t), Z_{6,к}(t)$  даны на рис. 4. Оказалось, что условная внешняя граница буферной подобласти изменяется монотонно, что нельзя сказать об условной внутренней границе. Явно прослеживается стремление внутренней границы к нулевому значению в конце годовых циклов. Однако этому препятствует тепловой поток от буферной подобласти в основную область в конце и в начале каждого годового цикла (см. рис. 3), что и изменило тенденцию поведения кривой  $z_n(t)$  на этих временных участках (см. рис. 4).



**Рис. 3. Изменение температур при разрядке в течение второго полугодия второго (а) и четвертого (б) годов. Кривые соответствуют 30-дневным интервалам (от 180 дней – линия 1, до 360 дней – линия 7).**



**Рис. 4. Динамика изменений геометрических характеристик  $F$  ( $F = Z_{6,к}, Z_{6,н}, Z_6$ ) в течение четырех лет непрерывной работы аккумулятора: 1 –  $Z_{6,к}$ , 2 –  $Z_{6,н}$ , 3 –  $Z_6$  (все величины в метрах).**

В конечном итоге, «противоборство» тенденций привело к небольшой средней глубине проникновения буферной подобласти в основную область. Эта особенность естественно не отразилась на динамике удаленной от  $z_{0,5}$  границы  $z_k$ , которая описывается гладкой монотонной кривой. Согласно теории размерностей она должна аппрок-

симироваться зависимостью:

$$Z_{\text{б.к}} = k_{\text{б.к}} (a_M t)^{0,5}. \quad (10)$$

Значение коэффициента  $k_{\text{б.к}} = 5,37$ . Напомним, что расчет по интегральному методу определяет протяженность буферной подобласти как  $R_{\text{б}} = 4,90(a_M t)^{0,5}$ . Учитывая произвольность численного определения  $z_{\text{к}}$  и  $z_{\text{н}}$  (по условию отклонения на  $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$ ), согласованность с [1] можно считать удовлетворительной.

Энергетические характеристики  $E_a$ ,  $E_{\text{ос}}$  и  $E_{\text{б}}$  представлены на рис. 5. Отчетливо видно, что накопление и извлечение теплоты из основной области аккумулятора имеют повторяющийся из года в год характер и этот годовой энергоцикл в количественном отношении неизменен. Происходит со временем только некоторое увеличение энергосодержания буферной подобласти. Причем эта характеристика имеет тенденцию к установлению. Если обратиться к температурным графикам, типа показанных на рис. 3, то можно отметить, что температура  $\langle T \rangle(t, z)$  нигде не опускалась ниже  $T_M$ . Следовательно, всегда есть возможность извлечь энергию буферной подобласти, тем более что ее величина мала по сравнению с энергосодержанием основной подобласти. Поэтому вывод о возможности полного извлечения ранее аккумулированной энергии, сделанный на основании выкладок по интегральному методу расчета [1], остается в силе.

Несмотря на довольно сложный вид распределений температур в буферной подобласти, к ним применим стандартный метод обобщения с помощью безразмерной зависимости:

$$\frac{\langle T \rangle - \langle T \rangle_{\text{к}}}{\langle T \rangle_{\text{н}} - \langle T \rangle_{\text{к}}} \approx \frac{\langle T \rangle - T_M}{T_0 - T_M} = \varphi(\zeta), \quad \zeta = \frac{z - z_{\text{н}}}{z_{\text{к}} - z_{\text{н}}}, \quad (11)$$

и рассчитанного по ней безразмерного энергосодержания («наполненности» температурных профилей):

$$\bar{e}_{\text{б}} = \int_0^1 \varphi(\zeta) d\zeta \quad (12)$$

Результаты подсчета этой величины (умноженной на 10) на протяжении четырех лет работы аккумулятора даны на рис. 6. Здесь же представлены значения плотности теплового потока  $q_0(t, z_{0,5})$  на конце теплообменника и плотности теплового потока  $q_{z_{0,5}}$  на границе основной области и буферной подобласти, умноженной на отношение  $R_{\text{с}}/R_0$ .

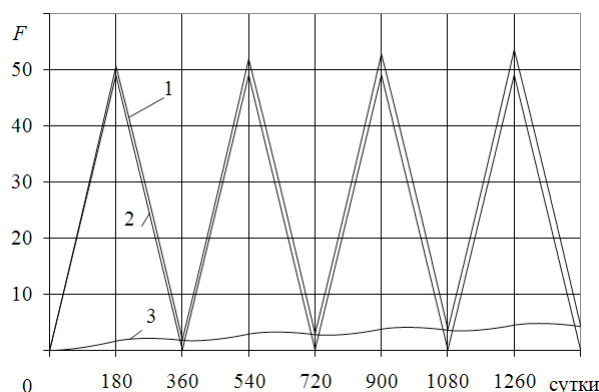
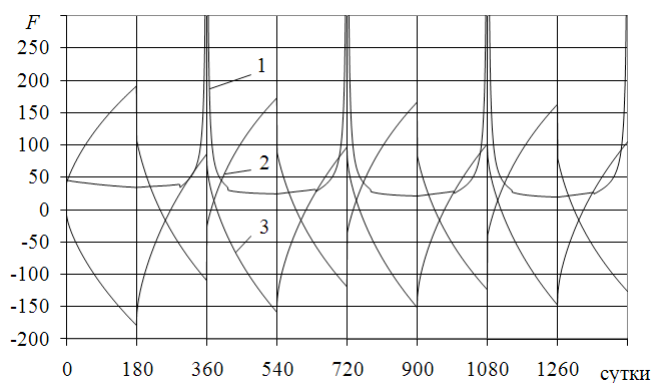


Рис. 5. Динамика изменений энергетических характеристик  $F$  ( $F = E_a, E_{\text{ос}}, E_{\text{б}}$ ) в течение четырех лет непрерывной работы аккумулятора: 1 —  $E_a$ , 2 —  $E_{\text{ос}}$ , 3 —  $E_{\text{б}}$  (все величины в  $10^8$  Дж).

Этот множитель, с некоторым допущением, позволяет сопоставить тепловые потоки на стенке теплообменника в конечном сечении и на границе областей. Несмотря на сложный характер распределений (11) их интегральная характеристика (12) оказалась мало изменяющейся на протяжении длительной работы аккумулятора. Существенные отклонения наблюдаются на интервалах в окрестности стыков годовых циклов. Здесь явно аномальные значения (12) обусловлены малой разностью  $(T_0 - T_M)$ , быстро стремящейся к нулю на этих интервалах. Если исключить эти аномальные значения, то энергетическая «наполненность» профилей температур окажется близкой к значению 0,4, полученному интегральным методом [1].

Интересно отметить, что при извлечении теплоты, как следует из рис. 6, на концевых участках теплообменника  $z \in [z_{0,5} - \Delta z, z_{0,5}]$  происходит некоторое время отток теплоты от этих участков теплообменника, обусловленный положительной разностью температур  $T_0(t) - \langle T \rangle(t, z_{0,5} - \Delta z)$ , в то время как аналогичная разность на остальных участках теплообменника отрицательная.

В справедливости сказанного можно убедиться и на основании данных, например на рис. 3, если учесть, что указанная выше разность на основных участках теплообменников была  $4,570 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Рис. 6. Динамика изменения «наполненности» профилей температур и плотностей теплового потока  $F$  ( $F = \bar{e}_6 \times 10$ ;  $q_0(t, z_{0,5})$ ,  $q_{z_{0,5}} \cdot R_c/R_\rho$ ) в течение четырех лет непрерывной работы аккумулятора (1 —  $\bar{e}_6 \times 10$ ; 2 —  $q_0(t, z_{0,5})$ ,  $Вт/м^2$ ; 3 —  $q_{z_{0,5}} \cdot R_c/R_\rho$ ,  $Вт/м^2$ ).**

### Выводы

Если кратко резюмировать результаты исследований, то численное моделирование процессов аккумуляции и извлечения теплоты

для центральных теплообменников грунтового аккумулятора удовлетворительно коррелируется с расчетами по интегральному методу [1]. Можно отметить только предпочтительность аналитического определения профиля температур в окрестности теплообменника (см. выкладки (1) — (7)), полученного при решении задачи Коши, полиномиальному распределению в краевой постановке этой задачи в интегральном методе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Накорчевский А.И.* Теоретические и прикладные аспекты грунтового аккумуляирования и извлечения теплоты. — Киев: Наук. думка, 2008. — 150 с.
2. *Андерсон Д., Таннехилл Дж, Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен.: В 2-х т. Т. 1. — М.: Мир, 1990. — 384 с.
3. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 150 с.

**Фиалко Н.М., Феофилов И.В.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ЗАМЕНЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА МАЗУТОМ

Актуальность для Украины вопроса о замене природного газа альтернативным топливом, и в частности мазутом, в большой мере связана со значительной долей, занимаемой природным газом в общем объеме потребляемых первичных энергоресурсов, а также с повышением цены на импортируемый природный газ до мирового уровня. Принципиальная возможность замены природного газа мазутом привлекательна тем, что, во-первых, в этом случае не требуется существенное изменение конструкций топливосжигающего и теплообменного оборудования и, во-вторых, теплотворная способность мазута выше на 10...15 % чем у природного газа.

Однако имеет место целый ряд факторов, затрудняющих широкое использование мазута в качестве котельно-печного топлива. К основным из них могут быть отнесены следующие:

- существенное изменение качества мазу-

та по сравнению с его аналогом, выпускаемым несколько десятков лет тому назад, ввиду более глубокой переработки нефти, и, как следствие, наличие значительных отложений на поверхностях нагрева, ухудшающих передачу тепла от продуктов сгорания;

- регламентированная нормами более низкая (на 25...30 °С), чем при сжигании природного газа, температура тепловых выбросов энергоустановок, что связано с наличием двуокиси серы в уходящих газах при сжигании мазута и необходимостью предотвращения серноокислотной коррозии;

- ухудшение экологических показателей энергоустановок при сжигании мазута, по сравнению с использованием природного газа за счет образования на порядок большего количества сажи, более чем в 2 раза окислов азота, значительно большего количества бензпирена, а также