

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАЯНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНОЙ МАССЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЕЙ

© 2012 М.С. Лапочкин, О.Г. Морозов

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию 29.09.2011

В статье рассмотрена проблема повышения эффективности процесса таяния снежно-ледяной массы. Предложено применение комбинированного энергетического воздействия микроволнового и ультразвукового полей. Построены и исследованы математические модели процесса микроволнового нагрева воды в разных фазовых состояниях, а также ультразвукового кавитирующего воздействия на межфазную границу. Выполнена физическая верификация математических моделей на основе исследований, выполненных на специально разработанном лабораторном стенде.

Ключевые слова: снежно-ледяная масса, процесс таяния, микроволновый нагрев, ультразвуковая кавитация.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации снежно-ледяной массы собранной с поверхности автомобильных дорог и городских улиц в зимний период времени является одной из наиболее приоритетных и актуальных задач городского хозяйства.

Некоторые из существующих установок для утилизации снежно-ледяной массы реализованы на основе применения одного вида воздействия, например, теплоэлектронагревателей [1], нагретой воды [3], сточных вод [4], жидкого или газообразного топлива [5], [6].

Наряду с вышеперечисленными источниками термонагрева, для ускорения процесса таяния, используется дополнительная интенсификация таяния снежно-ледяной массы. Например, в работе [2] осуществляется комбинированное воздействие горячего воздуха и инфракрасных интенсификаторов. В работе [7] в качестве источника тепла применяется нагретая вода, а в качестве дополнительного интенсификатора используется измельчитель-дробилка для предварительного измельчения снежно-ледяной массы. Известно также устройство [8], основанное на воздействии нагретой воды с использованием ультразвуковой интенсификации.

Недостатками снеготаялок [1]-[8] является низкая эффективность обработки при высоких энергозатратах, низкая экологическая безопас-

ность, сложность управления процессом таяния, необходимость использования большого количества воды для теплообмена.

Современные требования использования энергоэффективных и экологически безопасных систем приводят к поиску новых подходов для решения проблемы утилизации снежно-ледяной массы. Одним из наиболее эффективных способов таяния снежно-ледяной массы является энергетическая обработка микроволновым полем.

Микроволновая термообработка, благодаря ряду преимуществ таких, как возможность объемного нагрева при повышении равномерности распределения теплового поля, отсутствие вредных токсических выбросов в окружающую среду, отсутствие необходимости в использовании воды, в качестве теплоносителя, а также управление процессом нагрева дает значительные преимущества, над традиционными методами нагрева.

Работы [9],[10], посвящены математическому и физическому моделированию процесса микроволнового нагрева льда и 0,1 М NaCl в цилиндрических объемах. В работах [11,12], рассматривалось микроволновое таяние твердого слоя (льда) и жидкого слоя воды в волноводах прямоугольного сечения.

Вопросы микроволнового таяния с учетом трех фазовых состояний молекул воды: снега, льда и воды в виде слоев были рассмотрены в работе [13].

Для повышения эффективности процесса таяния снежно-ледяной массы предлагается осуществлять комбинированное энергетическое воздействие микроволнового и ультразвукового полей.

*Лапочкин Марат Сириневич, аспирант кафедры телевидения и мультимедийных систем.*

*E-mail: 11marat@mail.ru*

*Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем. E-mail: microoil@mail.ru*

Под действием ультразвуковых колебаний в воде со снегом происходит процесс ультразвуковой кавитации, который позволяет ликвидировать основное термосопротивление между снегом и водой – пограничный слой. При кавитации происходит разрыв непосредственно пограничного слоя, благодаря чему происходит быстрая передача энергии от воды к снегу [8].

**Целью настоящей работы** является рассмотрение вопросов математического и физического моделирования процесса таяния снежно-ледяной массы под воздействием комбинированных энергетических полей микроволнового и ультразвукового диапазона длин волн.

Задачи исследования:

1) Построение и исследование математической модели процесса таяния снежно-ледяной массы под воздействием микроволнового поля и ультразвукового кавитирующего воздействия на межфазную границу;

2) Экспериментальная верификация предлагаемых математических моделей.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТАЯНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДЯНОЙ МАССЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕЖФАЗНУЮ ГРАНИЦУ

Так как, микроволновый нагрев и ультразвуковая кавитация имеют различную природу влияния на воду в разных фазовых состояниях, что связано отличием частотного диапазона воздействия, то математические модели могут быть разделены и рассматриваться отдельно.

### 2.1. Математическая модель процесса микроволнового нагрева воды в разных фазовых состояниях

Рассматривается задача нагрева структуры из слоя воды и слоя снежно-ледяной массы находящейся в рабочей камере прямоугольной формы под воздействием электромагнитной волны модой  $TE_{10}$  и частотой 2,45 ГГц. В исходном состоянии в рабочей камере таяния находится слой снежно-ледяной массы, под которым располагается вода, предварительно налитая до уровня водоотвода. Поэтому, по мере таяния слоя снежно-ледяной массы, образующаяся талая вода не накапливается в рабочей камере таяния, а отводится из нее.

Геометрия задачи представлена на рис. 1.

Допущения.

1) Волна  $TE_{10}$ , распространяющаяся по камере прямоугольной формы, не зависит от оси  $Y$ . Поэтому, электромагнитное поле принимается,

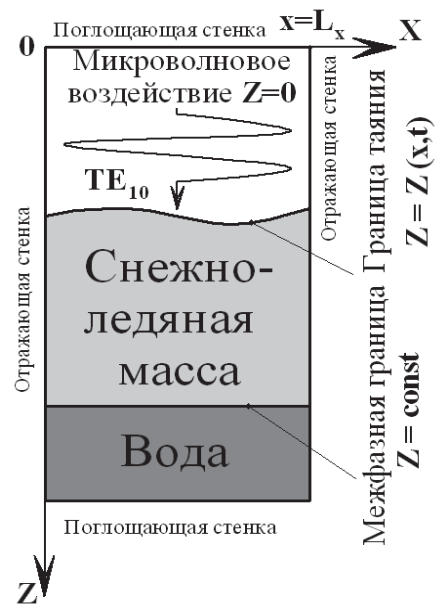


Рис. 1. Геометрия задачи

как двухмерное, зависящее лишь от осей  $X, Z$ .

2) Отсутствует поглощение микроволновой энергии воздухом внутри камеры.

3) Стенки камеры вдоль оси  $Z$  являются абсолютно проводящими.

4) Отсутствует влияние емкости образца на электромагнитное поле.

Граничные условия.

1) Абсолютно проводящие стенки. Граничные условия на поверхностях боковых стенок камеры выглядят:

$$E_h = 0, H_n = 0, \quad (1)$$

где  $n$  – нормальная и  $h$  – тангенциальная компоненты, соответственно.

2) Граничные условия между воздухом и поверхностью исследуемого материала принимают вид:

$$E_h = E'_h, H_h = H'_h, \quad (2)$$

$$D_n = D'_n, B_n = B'_n, \quad (3)$$

где ' обозначение одного из материалов.

3) Поглощающие граничные условия. На нижней стенке камеры выполняются поглощающие условия:

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \pm \vartheta \frac{\partial E_y}{\partial z}. \quad (4)$$

4) Волна, излученная от магнетрона, представляется в виде следующих компонент:

$$E_y = E_{yex} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

$$H_x = \frac{E_{yex}}{Z_H} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft), \quad (6)$$

где  $E_{\text{вх}}$  – входная интенсивность электрического поля,  $L_x$  – длина камеры вдоль оси  $X$ ,  $X_H$  – волновой импеданс.

5) Исследуемый образец изолирован от окружающей среды:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (7)$$

6) Условие движения границы таяния. Движение границы между слоем находящимся в твердом состоянии и жидким слоем описывается с помощью формулы Стефана:

$$\left( \lambda_{\text{мс}} \frac{\partial T_{\text{мс}}}{\partial z} - q_{\text{сп}} \Delta z - \lambda_{\text{жс}} \frac{\partial T_{\text{мс}}}{\partial z} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\partial z_{\text{сп}}}{\partial x} \right)^2 \right] = \rho_{\text{мс}} L_{\text{мс}} S_{\text{мс}} \frac{\partial z_{\text{сп}}}{\partial t}, \quad (8)$$

где  $\frac{\partial z_{\text{сп}}}{\partial t}$  – скорость движения границы таяния,

$L_{\text{мс}}$  – скрытая теплота плавления.

## 2.2. Математическая модель ультразвукового кавитирующего воздействия на межфазную границу

При кавитации происходит разрыв межфазной границы между снежно-ледяной массой и водой. Вследствие чего, осуществляется ускоренное теплопередачи от источника нагрева – микроволнового электромагнитного поля к снежно-ледяной среде. Поэтому, необходимо определить оптимальную интенсивность ультразвукового излучения, при которой эффективность кавитационного воздействия будет максимальной при минимальных энергозатратах. При этом, решается задача создания максимального количества кавитационных пузырьков в обрабатываемой среде, способных запасти максимальное количество энергии и взорваться за один период колебания ультразвукового воздействия.

Для создания математической модели были использованы результаты исследований полученных в работе [14] в приложении к задаче кавитационного воздействия на пограничный слой между снежно-ледяной массой и водой.

Параметром, характеризующим эффективность кавитационного воздействия, является индекс кавитации, определяющийся как отношение объема кавитационных пузырьков  $\Delta V$  к объему жидкой среды  $V$ .

$$K = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{4}{3} \pi (R^3 - R_0^3)}{\frac{4}{3} \pi (R_{\text{max}}^3 - R_0^3)} = \frac{R^3 - R_0^3}{R_{\text{max}}^3 - R_0^3}, \quad (9)$$

где  $R$  – средний радиус кавитационного пузырька,  $R_0$  – радиус зародыша,  $R_{\text{max}}$  – максимальное значение радиуса кавитационного пузырька (резонансный радиус), к которому он стремится в фазе разряжения.

При этом среднее во времени волновое сопротивление среды можно записать в виде:

$$\rho_{\text{к}} c_{\text{к}} = \rho_{\text{жс}} c_{\text{жс}} \left( \frac{(1 - \bar{K}) + \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \bar{K}}{(1 - \bar{K}) + \frac{\beta_{\Gamma}}{\beta_{\text{ж}}} \bar{K}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где  $c_{\text{к}}$  – скорость звука в кавитирующей жидкости,  $c_{\text{жс}}$  – скорость звука в сплошной жидкости,  $\bar{K}$  – средний индекс кавитации.

## 2.3. Анализ задач моделирования

В результате математического моделирования микроволнового нагрева воды в разных фазовых состояниях определялось распределение температурного поля в исследуемом образце, а также оценивались показатели энергопотребления, объема и времени таяния.

В результате математического моделирования ультразвукового кавитирующего воздействия на межфазную границу определялась оптимальная интенсивность ультразвукового излучения, при которой эффективность кавитационного воздействия максимальна при минимальных энергозатратах, а также оценивались показатели энергопотребления, объема и времени таяния.

## 3. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА ВОДУ В РАЗНЫХ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЯХ

Экспериментальная верификация предложенных математических моделей таяния снежно-ледяной массы посредством комбинированной энергетической обработки физическими полями микроволнового и ультразвукового диапазонов длин волн проводилась в лабораторных условиях и осуществлялась с помощью специально разработанного лабораторного макета.

На рис. 2. изображена структурная схема ус-

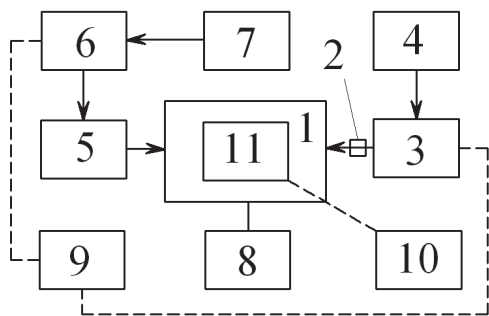


Рис. 2. Структурная схема

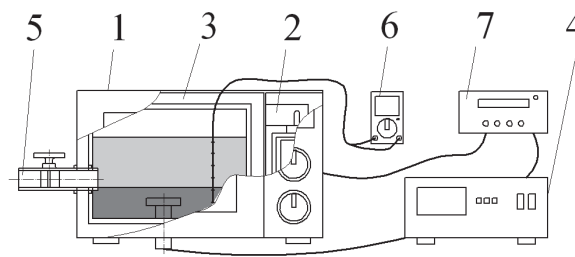


Рис. 3. Лабораторный макет

тройства таяния снежно-ледяной массы на основе комбинированной энергетической обработки микроволновым и ультразвуковым полями.

1 – рабочая камера таяния; 2 – волновод; 3 – микроволновый генератор; 4 – блок управления микроволновым генератором; 5 – ультразвуковая колебательная система; 6 – ультразвуковой генератор; 7 – блок управления ультразвуковым генератором; 8 – система водоотвода; 9 – прибор учета активной электроэнергии; 10 – измеритель температуры; 11 – исследуемая среда из различных фаз воды.

На рис. 3. представлен лабораторный макет устройства, который состоит из следующих модулей и блоков:

1 – микроволновая печь LG MS-1947W, включающая микроволновый генератор 2 рабочей частотой 2,45 ГГц и выходной мощностью 700 Вт соединенный через волновод сечением 90×45 мм с микроволновой рабочей камерой 3, прямоугольной формы, габаритными размерами 280×270×210 мм; 4 – ультразвуковой электронный генератор УЗТА-0,2/22-ОМ рабочей частотой 22 кГц с пьезоэлектрической колебательной системой; 5 – система водоотвода; 6 – цифровые измерители температуры Mastech-M89 с термопарами; 7 – прибор учета активной электроэнергии СЭО-1.19.702.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Электромагнитные и теплофизические параметры, используемые в вычислениях, приведены в табл. 1.

На рис.4 представлено температурное распределение в исследуемом образце в динамике процесса комбинированного воздействия микроволнового и ультразвукового полей. Видно, что с течением времени воздействия происходит повышение температуры в исследуемых слоях, а также уменьшение толщины снежно-ледяного слоя вследствие отведения талой воды из камеры таяния.

На рис. 5 показана зависимость энергии потребления от объема таяния снежно-ледяной массы. Сравним показатель энергопотребления в режиме комбинированной обработки с режимом микроволнового воздействия. В первом случае, при объеме таяния снежно-ледяной массы (0,006 м<sup>3</sup>) энергопотребление составило 142 Вт·ч, а во втором случае при таком же объеме таяния энергопотребление составило 124 Вт·ч. При этом, время таяния рассматриваемого объема в случае комбинированного воздействия – 345 с, а при микроволновом воздействии – 440 с (рис. 6).

Таким образом, если сравнить энергопотреб-

Таблица 1. Электромагнитные и теплофизические параметры

Параметры	Вода	Снежно-ледяная масса
$\lambda, Вт/(м \cdot К)$	0,610	2,14
$C_p, Дж/(кг \cdot К)$	4200	2100
$\rho, кг/м^3$	1000	550
$f, МГц$	2450	
$\mu, Гн/м$	$4\pi \times 10^{-7}$	
$\epsilon, \Phi/м$	$8,854 \times 10^{-12}$	
$E, В/м$	7000	

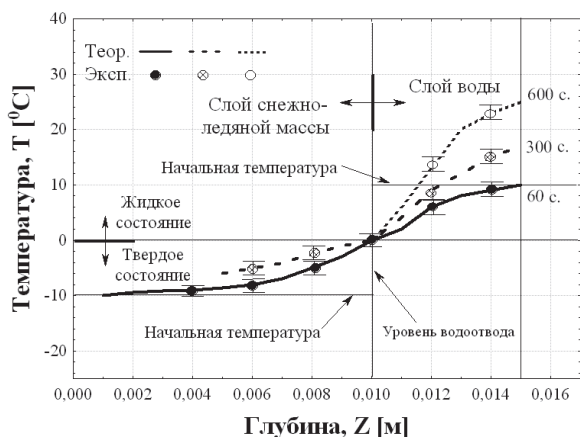


Рис. 4. Распределение температурного поля в исследуемом образце в процессе комбинированного воздействия

ление необходимое для таяния равного объема снежно-ледяной массы ( $0,006 \text{ м}^3$ ) за равное время таяния (345 с), то в режиме комбинированного воздействия микроволнового и ультразвукового полей требуется энергия – 142 Вт·ч, а при воздействии микроволнового поля – 159 Вт·ч. Эффективность комбинированного воздействия выше на 10,7 %.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе были разработаны математические модели, проведена их физическая верификация и достигнуто повышение эффективности процесса таяния снежно-ледяной массы посредством комбинированной энергетической обработки полями микроволнового и ультразвукового диапазона длин волн на 10,7% по сравнению с применением только микроволнового воздействия при равных объемах таяния и времени обработки.

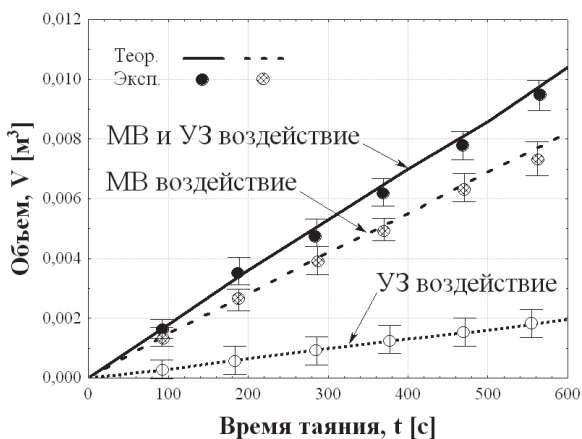


Рис. 6. Зависимость объема таяния от времени воздействия

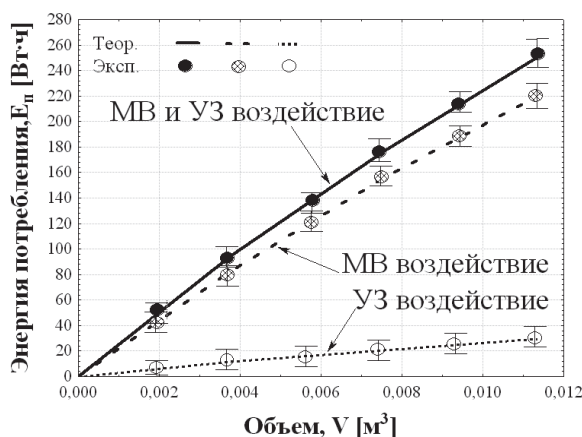


Рис. 5. Зависимость энергии потребления от объема таяния

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2005107630/11, 21.03.2005.
2. Патент РФ № 2002115841/03, 13.06.2002.
3. Патент РФ № 4939409/11, 27.05.1991.
4. Патент РФ № 2003106327/03, 07.03.2003.
5. Патент РФ № 2001130735/28, 15.11.2001.
6. Патент РФ № 2001105996/11, 05.03.2001.
7. Патент РФ № 2004114769/20, 19.05.2004.
8. А.С. СССР № 443145/34, 15.09.1974.
9. Microwave thawing of cylinders / B.J. Pangrle, K.G. Ayappa, H.T. Davis, E.A. Davis, J. Gordon // AIChE J., 1991. V. 37. P.1789-1800.
10. Microwave Thawing of Lossy Dielectric Materials / B.J. Pangrle, K.G. Ayappa, E. Sutanto, E.A. Davis and J. Gordon // Chemical Engineering Communications, 1992. V.112. P. 39-53.
11. Numerical analysis microwave melting of ice-saturated porous medium filled in a rectangular waveguide with resonator using a combined transfinite interpolation and PDE methods / K. Chaiyo, P. Ratanadecho // Int. J. Heat Mass Trans., 2011. V. 54. P. 2043-2055.
12. A numerical and experimental investigation of the modeling microwave melting of frozen packed beds using a rectangular wave guide / P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori // Int. Comm. Heat Mass Trans., 2001. V. 28., No.6. P. 751-762.
13. Лапочкин М.С. Морозов О.Г. Исследование процесса микроволнового нагрева различных фаз воды в виде трехслойных структур: теория и эксперимент // Вестник МарГТУ. Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. Т.12. №.2. С. 24-29.
14. Барсуков Р.В. Исследование процесса ультразвукового воздействия на технологические среды и повышение эффективности технологических аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2005. 18 с.

**EFFECTIVENESS INCREASE OF MELTING OF SNOW-ICE MASS  
BY COMBINED ENERGY EXPOSURE MICROWAVE  
AND ULTRASONIC FIELDS**

© 2012 M.S. Lapochkin, O.G. Morozov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev

In article we described problem of energy effectiveness increase of melting process of snow-ice mass. The use of combined energy exposure microwave and ultrasonic is suggested. Mathematical models of microwave heating process of water in different phase state and also ultrasonic cavitation exposure on interphase boundary are developed and researched. Physical verification mathematical models base on investigations realized on special developed laboratory bench is performed.

Key words: snow-ice mass, melting process, microwave heating, ultrasonic cavitation.

---

*Marat Lapochkin, Post-graduate Student at the Television and Multimedia System Department.*

*E-mail: 11marat@mail.ru*

*Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Television and Multimedia System Department.*

*E-mail: microoil@mail.ru*