

УДК 504.4.054, 504.064.3

Н. И. Куракина, А. В. Агадилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Алгоритм моделирования аварийных разливов нефти в технологии геоинформационных систем

Исследованы вопросы поведения нефтяного загрязнения в морских акваториях при аварийных разливах. Вследствие анализа различных математических моделей распространения нефтяных разливов в морских акваториях разработан алгоритм расчета параметров загрязнения, учитывающий характеристики растекания и перемещения нефтяного пятна. Каждую область нефтяного разлива будем принимать как растекающийся эллипс, вытянутый по направлению течения. Для автоматизации алгоритма расчета в приложении ModelBuilder построена модель определения области нефтяного загрязнения и визуализации результатов расчета на карте. В качестве объекта исследования выбрана акватория Финского залива. Проведен анализ зависимости результатов моделирования от характеристик нефтяного разлива и метеоусловий. Осуществлена оценка адекватности модели и исследована зависимость достоверности результатов моделирования от массы разлива, параметров течения и времени после разлива. На базе ГИС ArcGIS for Desktop построена система моделирования аварийных разливов нефти. По результатам расчета построены тематические карты загрязнения углеводородами акватории Финского залива.

Нефтяное загрязнение, аварийный разлив нефти, моделирование, ГИС

Попадание нефтепродуктов в морские акватории при авариях является одной из наиболее трудно устранимых чрезвычайных ситуаций (ЧС). Акватории портов наиболее подвержены опасности массового нефтяного загрязнения в результате различных нефтеналивных работ и большой концентрации нефтяных танкеров. Нефтяные загрязнения могут являться следствием как аварии и утечки на танкерах, так и аварии и технологических утечек на нефтеналивных терминалах.

Нефть – это продукт, распадающийся в течение длительного времени, который при попадании на поверхность воды очень быстро образует плотную пленку, препятствующую доступу воздуха и света [1]. В результате загрязнения разрушается флора и фауна, гибнут птицы и многие морские млекопитающие, микроорганизмы. Для предотвращения всех этих последствий необходимо иметь механизм оценки масштабов нефтяных разливов и оперативного устранения возникающих последствий.

Эффективным методом прогнозирования ЧС является математическое моделирование с использованием геоинформационных систем (ГИС) и технологий. Использование ГИС-технологий обуславливается их наглядностью и простотой представления информации в виде карты.

Целью описываемой работы было создание в приложении ModelBuilder модели расчета параметров нефтяного разлива и нанесения области загрязнения на карту, а также исследование зависимости размеров области загрязнения от характеристик разлива и метеорологических условий.

Математическое моделирование. При расчетах моделей нефтяных разливов перенос нефтяного загрязнения подразделяется на 2 типа: адвекция (перенос, обусловленный полем усредненной скорости течения) и диффузия (наличие случайных хаотических составляющих в поле скорости течения) [2].

У большей части нефтепродуктов первая гравитационно-инерционная стадия растекания длится не более нескольких минут и при расчетах не учитывается [3]. Предполагаем, что источник вытекания нефти можно считать точечным и в качестве входного параметра принять площадь A_0 первичной (гравитационно-инерционной) фазы растекания, которая определяется формулой Фей [4]:

$$A_0 = 0.84\pi \left(\frac{\Delta_w g V_0^5}{v_w^2} \right),$$

где $\Delta_w = (\rho_w - \rho) / \rho_w$ – относительная разность плотностей ρ нефти и ρ_w воды; g – ускорение

свободного падения; V_0 – объем разлива; ν_w – коэффициент кинематической вязкости воды.

Поле нефтяного загрязнения принимается в виде совокупности связанных областей [5]. Для каждой области рассчитывается скорость движения границы, затем каждая область масштабируется в зависимости от изменения положения границы. Все частицы областей смещаются пропорционально их расстоянию до центра масс. Каждая область нефтяного разлива представляется в форме растекающегося эллипса, вытянутого по направлению течения (ветра). Согласно решению Фея [4] малая полуось эллипса Q рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = c_1 \Delta_w^{1/6} V_0^{1/3} t^{1/4},$$

где $c_1 = 1.417$ – эмпирическая константа; t – время после разлива.

При расчете большой полуоси R учитывается скорость и направление ветра:

$$R = Q + c_2 \nu^{4/3} t^{4/3},$$

где $c_2 = 0.15$ – эмпирическая константа; ν – скорость ветра.

Смещение начальных координат разлива рассчитывается по формулам:

$$X_1 = X + 0.03 \nu t \cos \alpha,$$

$$Y_1 = Y + 0.03 \nu t \sin \alpha,$$

где X и Y – начальные координаты места разлива; α – направление ветра.

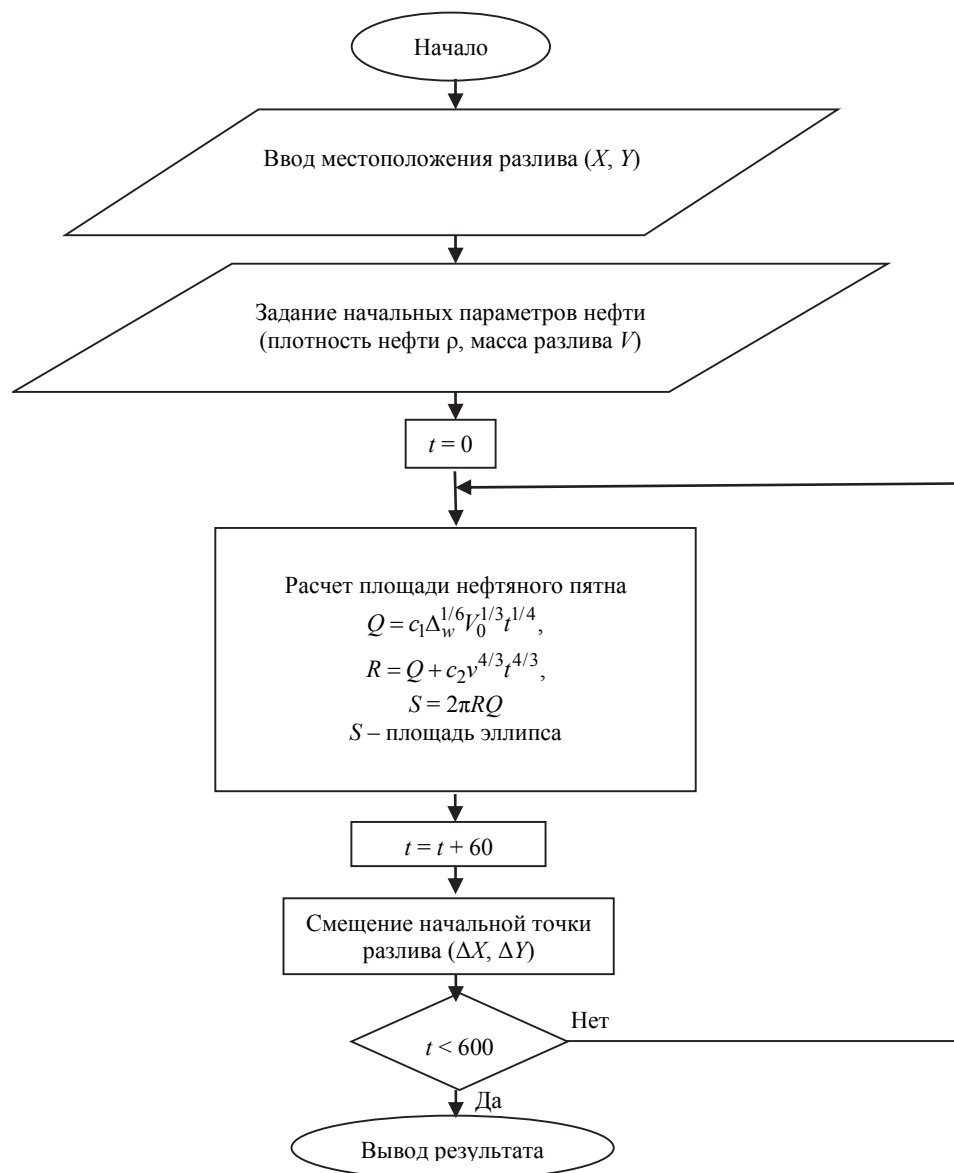


Рис. 1

Таблица 1

Поле	Тип данных	Описание параметра и единиц измерения
Napr_tech	Целое число	Направление течения, ...°
Skor_tech	Целое число	Скорость течения, м/с
Shape_Length	Число с плавающей точкой	Длина объекта, м
Shape_Area	Число с плавающей точкой	Площадь объекта, м ²

Таблица 2

Поле	Тип данных	Описание
OBJECTID	—	Идентификатор объекта
X_koordinata	Число с плавающей точкой	Координата места разлива по оси X (вводится оператором)
Y_koordinata	Число с плавающей точкой	Координата места разлива по оси Y (вводится оператором)
Time_razliva	Целочисленный	Время, прошедшее после разлива, мин

Направление ветра в исходных параметрах задается в градусах, и для дальнейшего расчета значение в градусах необходимо преобразовать в радианы по формуле

$$\beta = \alpha \frac{\pi}{180}.$$

Также необходимо перевести результат из метров в градусы. Для этого можно воспользоваться переводом из метрической системы в градусную через морские мили, согласно которому морская миля определена как расстояние одной минуты широты вдоль меридиана на заданной широте. В одной морской миле содержится 1852 м. Таким образом, в одном градусе: $1852 \cdot 60 = 111\,120$ м, или 111.120 км.

Итоговые формулы расчета смещения центра нефтяного разлива в заданный момент времени:

$$X_1 = X + (0.03vt \cos \beta) / 111\,120,$$

$$Y_1 = Y + (0.03vt \sin \beta) / 111\,120.$$

Алгоритм моделирования аварийных разливов нефти. Блок-схема алгоритма моделирования аварийных разливов нефти на основе изложенного выше подхода показана на рис. 1. В качестве объекта исследования выбрана акватория Финского залива.

Исходными данными для моделирования являются слой *techenie* и таблица *Tabl_got_neft*.

Слой *techenie* представляет собой набор ячеек (полигонов), на которые разбита акватория Финского залива [6]. Каждая ячейка описывается набором атрибутов. В табл. 1 приведен перечень полей атрибутов с их описанием. Скорость и направление течения в пределах одной ячейки принимаются постоянными. Метеорологические данные на территории Финского залива взяты из многолетних наблюдений и усреднены по месяцам и сезонам.

Таблица *Tabl_got_neft* (табл. 2) необходима для задания начального местоположения точки разлива и временного шага расчета параметров нефтяного пятна.

Оператором вводятся начальные координаты точки разлива и временной шаг (составляет 1 ч). Затем оператором задаются параметры нефтяного разлива – масса разлива и плотность нефти. Плотность нефти по умолчанию принимается равной 786 кг/м³ как наиболее характерной при транспортировке в акватории Финского залива. Плотность воды в Финском заливе неравномерна и изменяется в пределах от 1001 до 1005 кг/м³. По умолчанию значение плотности воды принимается равным 1003 кг/м³.

Модель расчета параметров нефтяного разлива. Для автоматизации алгоритма расчета параметров нефтяного разлива и визуализации данных на карте разработана модель в приложении ModelBuilder. Скрин окна программы приведен на рис. 2. Буква «Р» возле овалов означает, что соответствующие параметры задаются оператором вручную.

ModelBuilder – это приложение для создания и редактирования моделей геообработки. Данные модели способствуют автоматизации и документированию результатов анализа и процессов управления данными [7]. В ModelBuilder модель строится схемой, которая соединяет между собой последовательности процессов и инструментов геообработки, используя для расчетов выходные данные одних процессов, являющиеся входными для других.

На вход подаются данные из таблицы *Tabl_got_neft*, а также параметры, задаваемые оператором (масса разлитой нефти, плотность нефти, плотность воды и др.). Пятно строится

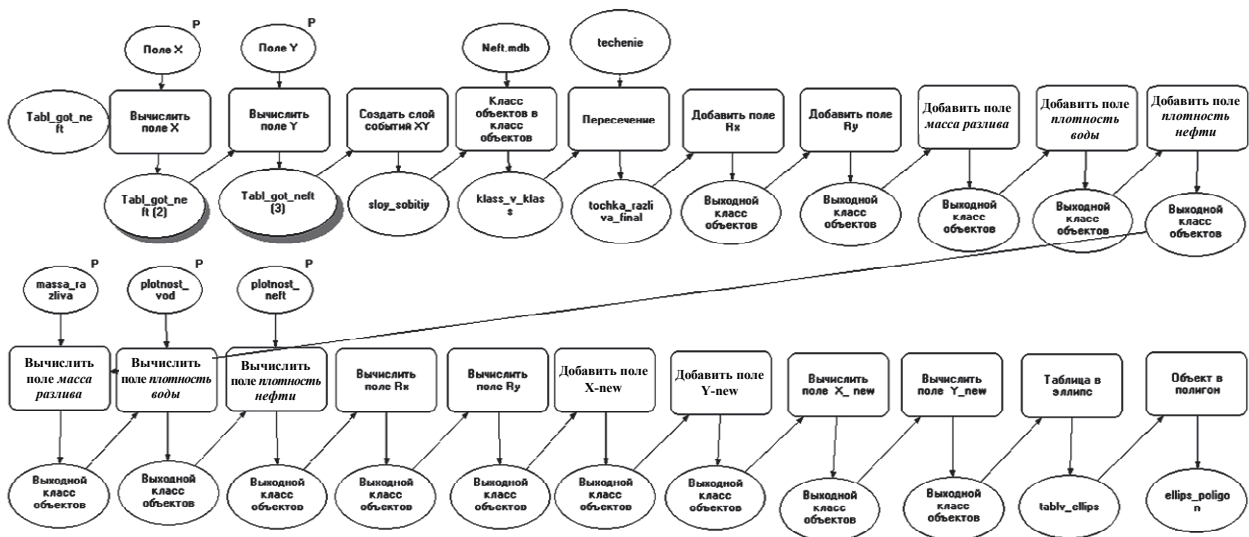


Рис. 2

Таблица 3

Параметр	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4
Масса разлива, т	250	250	350	350
Направление течения, ...°	90 (Восток)	0	90	135
Скорость течения, м/с	10	5	20	20

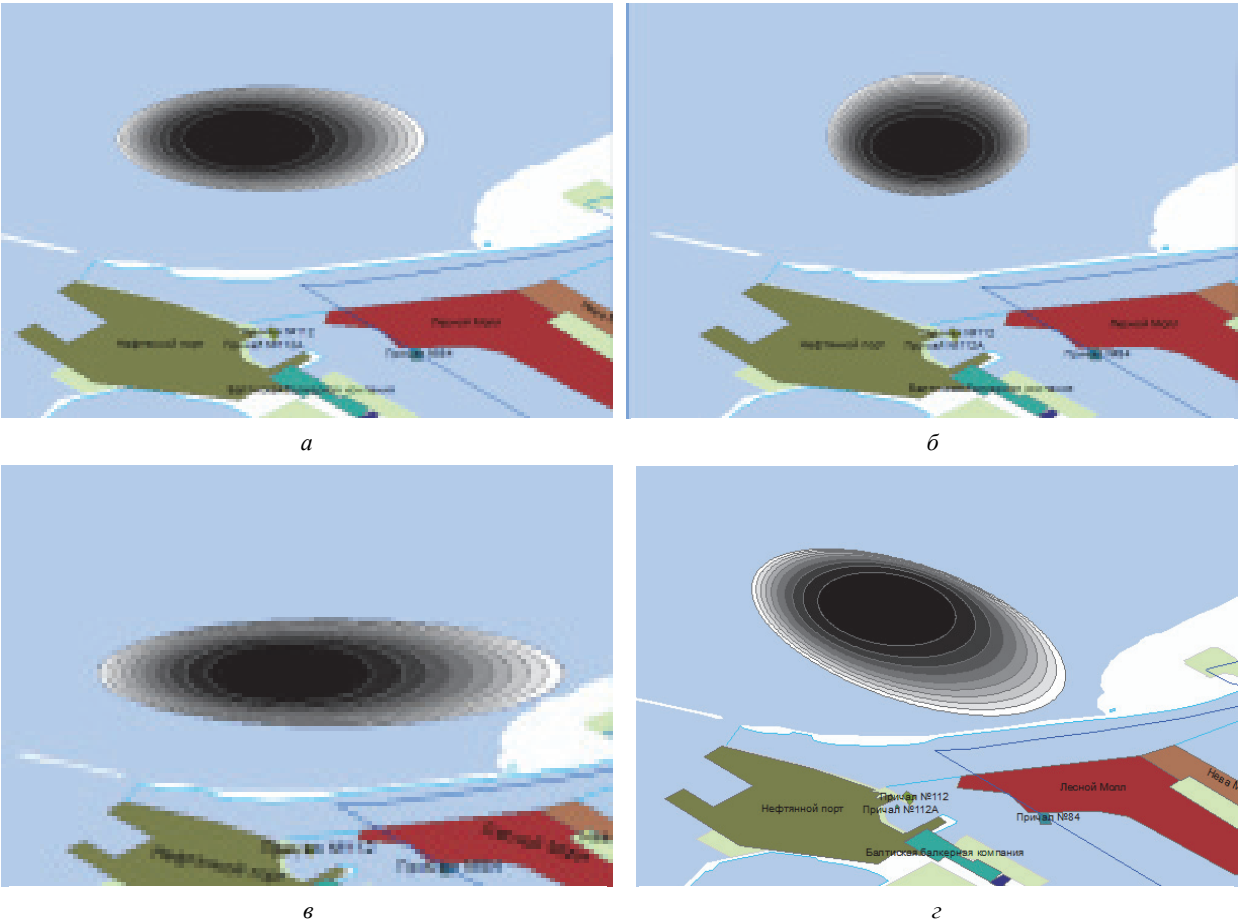


Рис. 3

Таблица 4

Параметр	Модель из методических рекомендаций				Разработанная модель			
	1	2	4	6	1	2	4	6
Большая полуось эллипса R , м	508	520	561	585	543.4	557.7	571.2	581.4
Малая полуось эллипса Q , м	502	509	525	545	453.8	475.4	510.9	548.7

для каждого часа после начала разлива. Всего строится 10 эллипсов, так как модель рассчитана на 10...12 ч после аварии. Дальнейшие расчеты становятся не актуальными из-за того, что начинается процесс эмульгирования в воде.

Исследование зависимости области загрязнения от характеристик разлива и метеорологических условий. Реализованная модель расчета разлива нефти позволила исследовать зависимость размеров и местоположения области загрязнения углеводородами от массы разлива, скорости и направления течения. Некоторые исходные данные анализа сведены в табл. 3.

По результатам анализа в ArcGIS for Desktop построены тематические карты (рис. 3: *а* – пример 1; *б* – пример 2; *в* – пример 3; *г* – пример 4). Из рисунков видно, что размер следа загрязнения растет при увеличении массы разлива и скорости ветра, что подтверждает адекватность построенной модели [8].

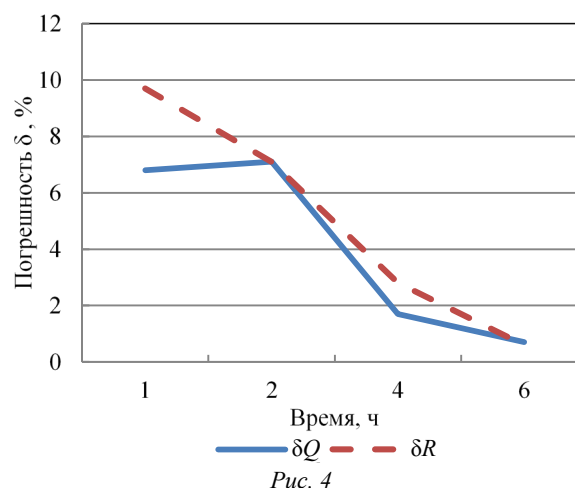
Для проверки достоверности результатов моделирования было осуществлено их сравнение с образцовой моделью, взятой из методических рекомендаций ФГОУ ВПО Морская государственная академия им. адмирала Ф. Ф. Ушакова «Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов на море и внутренних акваториях. Расчет достаточности сил и средств». В методических рекомендациях приводятся различные характеристики нефтяных пятен при разных входных параметрах.

Для проверки достоверности результатов моделирования были взяты идентичные входные параметры для обеих моделей. В качестве примера рассмотрим случай низкой скорости ветра и большой массы разлива. Входные данные: масса разлива 1500 т, плотность нефти 786 кг/м³, плот-

ность воды 1020 кг/м³, скорость ветра 5 м/с, направление ветра 315° (Северо-Запад).

Сравнение производилось по результатам расчета большой и малой полуосей эллипса для разных временных шагов (табл. 4).

Были определены оценки относительной погрешности расчета малой (δQ) и большой полуосей (δR) для каждого периода времени. Результат анализа погрешностей представлен в виде графика (рис. 4).



Из графика видно, что относительная погрешность расчета полуосей нефтяного пятна не превышает 11 % и уменьшается с течением времени после разлива.

В результате проделанной работы были изучены общедоступные данные о поведении нефтяных пятен на водной поверхности. На основе исследований были выбраны и подробно рассмотрены такие свойства нефти, как растекание и перемещение. В приложении ModelBuilder разработана модель расчета параметров нефтяного разлива, осуществлена оценка адекватности и достоверности модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков П. А., Бердников С. В., Сурков Ф. А. ГИС ориентированный подход к моделированию разливов нефтепродуктов в Баренцевом море // Геоинформатика. 2011. № 1. С. 10–16.
2. Озмидов Р. В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 125 с.

3. Blokker P. C. Spreading and evaporation of petroleum products on water // Proc. 4th Intern. Harbour Congress. Verslagboek, Antwerp, The Netherlands, 1964, P. 911–919.
4. Fay J. A. The spread of oil slicks on a calm sea. Oil on the sea. New-York: Plenum Press, 1969. P. 53–63.

5. Мановян А. К. Технологии первичной переработки нефти и природного газа. М.: Химия, 2001. 568 с.

6. Куракина Н. И., Булганин С. Ю., Гридина Е. Г. Пространственный анализ загрязнения акватории Финского залива в технологии ГИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 1. С. 56–62.

7. Куракина Н. И. Геоинформационные системы в экологии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.

8. Kurakina N. I., Suloeva E. S. Integral assessment and spatial modeling of water areas pollution in the GIS technology // Proc. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. Saint Petersburg, 2016. P. 770–771.

N. I. Kurakina, A. V. Agadilov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE ALGORITHM FOR MODELING OF EMERGENCY OIL SPILLS IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM TECHNOLOGY

The issues of the behavior of oil pollution in marine areas during accidental spills are investigated. As a result of analysis mathematical models of the spreading of oil spills in water surfaces, an algorithm for calculating pollution parameters was developed, taking into account the characteristics of spreading and movement of an oil spill. The each area of the oil spill is considered to be a spreading ellipse, elongated in the direction of flow. The model for determining the area of oil pollution and visualizing the calculation results on a map has been built in Model Builder to automate the calculation algorithm. The water area of the Gulf of Finland was chosen as the object of study. The analysis of the simulation results on the characteristics of the oil spill and weather conditions was completed. The model adequacy was assessed and the dependence of the reliability of the simulation results on the mass of the spill, flow parameters and time after the spill was investigated. On the basis of the ArcGIS for Desktop GIS a project for modeling oil spills has been implemented. Based on the calculation results, thematic maps of hydrocarbon pollution in the waters of the Gulf of Finland were constructed.

Oil pollution, emergency oil spill, modeling, GIS

УДК 681.5

Ю. В. Ильюшин

Санкт-Петербургский горный университет

И. М. Новожилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Математические модели объектов с распределенными параметрами с импульсным входным воздействием

Особенность теории управления состоит в том, что в ней полностью отвлекаются (абстрагируются) от назначения, физической природы и конструктивных особенностей САУ и составляющих их элементов, а изучение процессов и характеристик осуществляется с помощью абстрактных математических описаний (моделей). Математическая модель САУ представляет собой запись всех тех физических законов, которым подчиняются изменения физических переменных и явлений в исследуемой системе. Получение математической модели является одним из важнейших начальных этапов исследования, непосредственно предшествующих применению методов анализа и синтеза. В статье рассматривается методика построения математической модели цилиндрического нагревательного элемента. Представлены 3 способа построения – 2 сеточных метода различной размерности и метод на основе функции Грина. На основе эксперимента можно сделать вывод об идентичности полученных результатов.

Системный анализ, управление, распределенные системы, абсолютная устойчивость

Теория автоматического управления как наука находится в стадии своего развития. Известно, что в теории систем с распределенными парамет-

рами, особенно нелинейных, остается достаточно много нерешенных проблем. При решении практических задач используется конечномерная