

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 624.139

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТА
ПОД РЕЗЕРВУАРОМ С НЕФТЬЮ

Г.В. Аникин, К.А. Спасенникова

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; anikin@ikz.ru

Приведены результаты, полученные в ходе компьютерного моделирования системы охлаждения резервуара с нефтью объемом 20 000 м³, установленного на Ванкорском месторождении. Показано, что результативность работы сезонных охлаждающих устройств зависит не только от усредненных за определенный период значений температуры атмосферы и скорости ветра, но и от стохастических флуктуаций этих величин.

Компьютерное моделирование, грунт, система охлаждения, термосифон

COMPUTER MODELLING OF THE GROUND COOLING SYSTEM UNDER THE OIL-TANK

G.V. Anikin, K.A. Spasennikova

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; anikin@ikz.ru

The work presents the results obtained during computer modelling of the cooling system of oil-tank with volume 20 000 m³ installed on the Vankorsky oilfield. It has been demonstrated that the productivity of cooling system work depends both upon the mean atmosphere temperature and wind speed, and upon the stochastic fluctuations of these values.

Computer modelling, soil, cooling system, thermosyphon

Для укрепления оснований зданий и сооружений, построенных на вечной мерзлоте, используется метод замораживания грунтов под этими основаниями. Замораживание грунтов производится с помощью холодильных машин или сезонных охлаждающих устройств (СОУ), не требующих затрат электрической энергии. Использование СОУ позволяет не только экономить электрическую энергию, но и производить охлаждение грунтов в районах, где электричество недо-

ступно, например на нефтепроводах и газопроводах. Начиная с середины XX в. в качестве СОУ использовались термосифоны [Пиоро, 1991], однако в последние годы в строительстве стали применяться более совершенные СОУ [Долгих и др., 2008], такие как: 1) горизонтальная естественно-трубчатая система (ГЕТ), позволяющая замораживать большие площади толщиной 2–3 м; 2) система вертикальная естественно-трубчатая (ВЕТ), с помощью которой можно замораживать объемы грунта большой площади и толщиной до 10 м; 3) глубинные СОУ, позволяющие замораживать грунт на небольшой площади на глубину до 100 м, и т. д. Всегда СОУ имеет испаритель и конденсатор. Испаритель представляет собой систему труб, соприкасающихся с грунтом, конденсатор контактирует с атмосферой и расположен на несколько метров выше испарителя. Блок-схема СОУ представлена на рис. 1.

Когда температура атмосферы становится ниже температуры грунта, давление насыщенных паров в конденсаторе падает, вызывая понижение давления в испарителе. Поскольку температура в испарителе при этом не меняется, давление в нем становится ниже давления насыщенных паров,

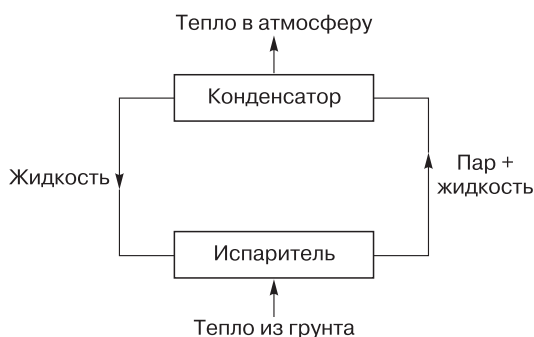


Рис. 1. Блок-схема двухфазного сезонного охлаждающего устройства.

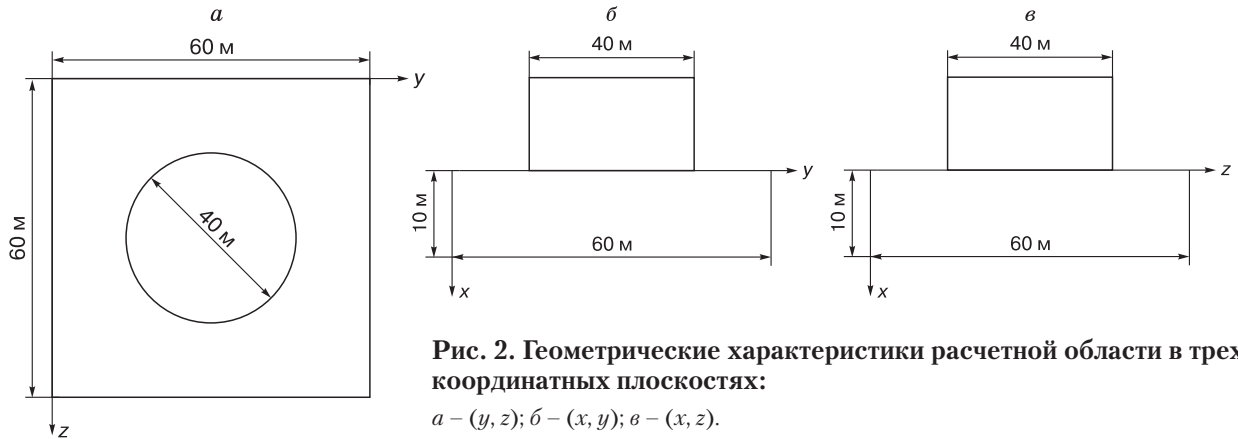


Рис. 2. Геометрические характеристики расчетной области в трех координатных плоскостях:

$a - (y, z); б - (x, y); в - (x, z).$

вызывая кипение хладагента и его циркуляцию внутри СОУ. Смесь парообразного и жидкого хладагента поступает в конденсатор. В конденсаторе пар конденсируется, и конденсат вместе с принесенной паром жидкой фазой под действием гравитации стекает в испаритель.

Парообразование в испарителе сопровождается оттоком тепла из грунта, а конденсация – выделением тепла в конденсаторе с последующим его отводом в атмосферу. Процессы теплопереноса внутри СОУ были детально исследованы в работах [Аникин и др., 2009б; Аникин, Спасенникова, 2011; Аникин и др., 2011а]. Приближенные аналитические методы расчета теплопереноса в грунтах, охлаждаемых СОУ, представлены в работах [Аникин и др., 2008, 2009а, 2011б]. В настоящей статье моделировались процессы теплопереноса в грунте, охлаждаемом системами ГЕТ [Долгих и др., 2008], под резервуаром с горячей нефтью.

Авторами рассчитаны температурные поля и динамика работы системы охлаждения резервуара, содержащего нефть при температуре 40 °С. Система охлаждения состоит из 10 конденсаторных блоков с площадью оребрения 100 м² каждый, поднятых на высоту 3,83 м относительно труб испарителей. Трубы испарителей покрывают площадь круга диаметром 46 м, расстояние между трубами испарительной системы составляет 0,5 м. Диаметр резервуара 40 м. Под резервуаром находится гидрофобный слой толщиной 280 мм, затем слой песка толщиной 120 мм, наконец слой пеноплекса толщиной 450 мм. Климатические данные взяты по метеостанции Ванкор, расположенной в пос. Советская Речка. Вычисления производились для среднесуточных, среднедекадных и среднемесячных значений температуры и скорости ветра. Расчетный интервал – с начала сентября 2009 г. по конец августа 2010 г., начальная температура грунта принималась равной 1 °С.

Для расчета теплопереноса в грунте применялся метод эффективной теплоемкости

[Самарский, 2003], в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в виде

$$\left[c + L\delta(T - T_f) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где c – объемная теплоемкость грунта; λ – коэффициент теплопроводности грунта; T – температура; T_f – температура фазового перехода; x, y, z – декартовы координаты; t – время; $\delta(T - T_f)$ – дельта-функция Дирака. Величина L задается выражением

$$L = r(w - w_{нв})\gamma_{ск}, \quad (2)$$

где r – удельная теплота плавления льда; w – влажность грунта; $w_{нв}$ – влажность незамерзшей воды; $\gamma_{ск}$ – объемная плотность скелета.

Расчетная область приведена на рис. 2. Сетка пространственных координат в расчетной области задается следующими выражениями:

$$x_i = ih_x, \quad 0 \leq i \leq 100, \quad h_x = 0,1 \text{ м};$$

$$y_j = jh_y, \quad 0 \leq j \leq 600, \quad h_y = 0,1 \text{ м};$$

$$z_k = kh_z, \quad 0 \leq k \leq 60, \quad h_z = 1 \text{ м};$$

$$t_n = \tau n, \quad 0 \leq n \leq 36\,500, \quad \tau = 0,01 \text{ сут},$$

где τ – шаг по времени.

Трубы испарительной системы расположены параллельно оси z . Разностная схема, соответствующая уравнению (1), записывается в виде

$$\begin{aligned} T(i, j, k, n + 1) = & T(i, j, k, n) + \\ & + \frac{1}{h_x^2} \left[a(i, j, k) \tau (T(i + 1, j, k, n) + \right. \\ & \left. + T(i - 1, j, k, n) - 2T(i, j, k, n)) \right] + \\ & + \frac{1}{h_y^2} \left[a(i, j, k) \tau (T(i, j + 1, k, n) + \right. \\ & \left. + T(i, j - 1, k, n) - 2T(i, j, k, n)) \right] + \\ & + \frac{1}{h_z^2} \left[a(i, j, k) \tau (T(i, j, k + 1, n) + \right. \\ & \left. + T(i, j, k - 1, n) - 2T(i, j, k, n)) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

где

$$a(i, j, k) = \begin{cases} a_M & \text{при } T(i, j, k, n) < T_f - \Delta, \\ 0,5(\lambda_M + \lambda_T) & \text{при } T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta, \\ 0,5(c_M + c_T) + \frac{L}{2\Delta} & \text{при } T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta, \\ a_T & \text{при } T(i, j, k, n) > T_f + \Delta. \end{cases}$$

Здесь a_T, a_M – температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно; λ_T, λ_M – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта; c_T, c_M – объемные теплоемкости талого и мерз-

лого грунта. Величина Δ определяет в методе эффективной теплоемкости [Самарский, 2003] диапазон температур, при которых идет фазовый переход, а именно $T_f - \Delta \leq T(i, j, k, n) \leq T_f + \Delta$. При

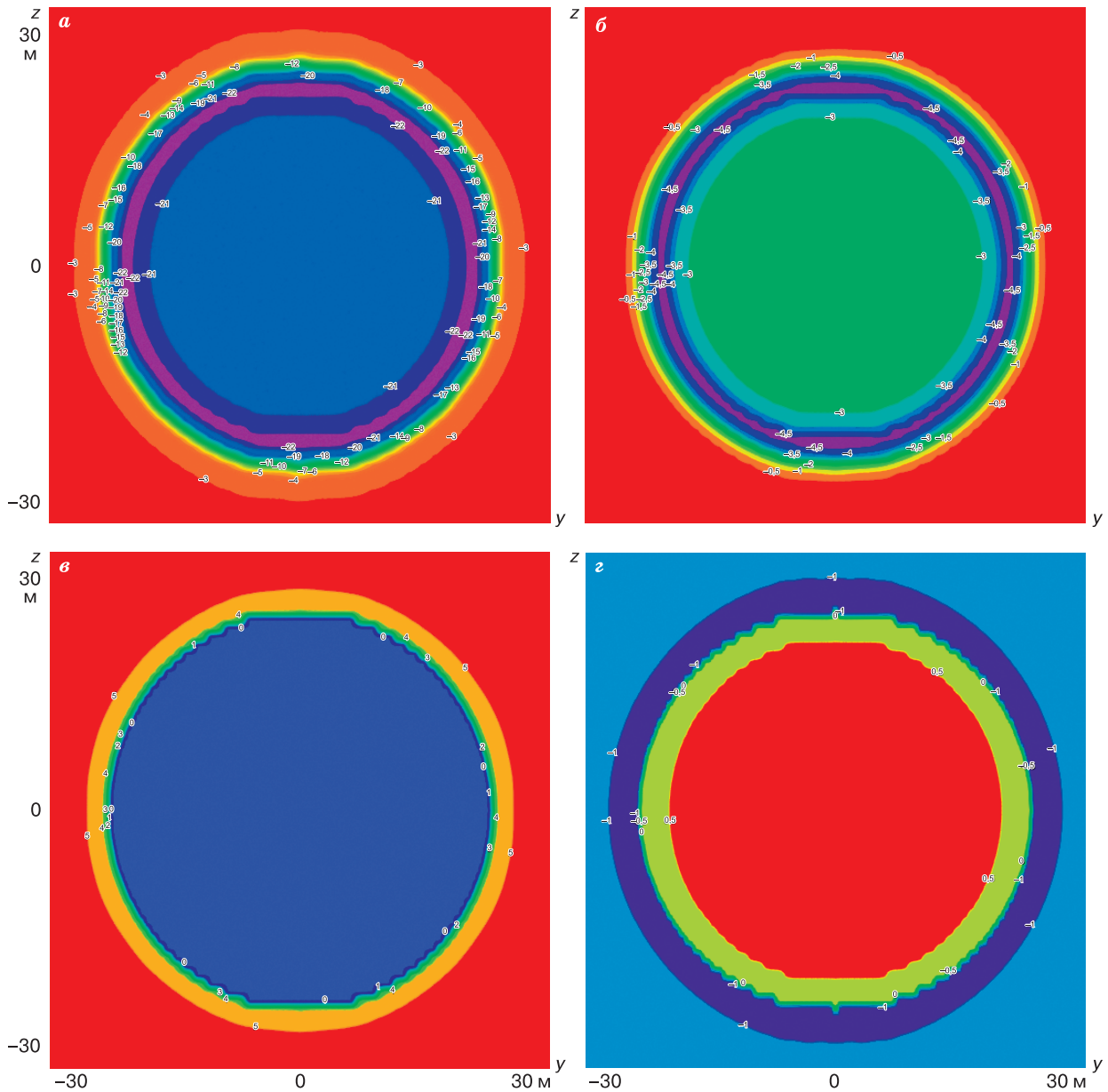


Рис. 3. Температура на нижней кромке пеноплэкса на конец февраля (а), мая (б), августа (в) и ноября (з).

расчете $a(i, j, k)$ дельта-функция Дирака в (1) заменена на функцию $f(T-T_f)$, заданную следующими выражениями [Самарский, 2003]:

$$f(T-T_f) = \begin{cases} 0 & \text{при } |T-T_f| > \Delta, \\ \frac{1}{2\Delta} & \text{при } |T-T_f| \leq \Delta. \end{cases}$$

На боковых поверхностях расчетной области принималось граничное условие второго рода с тепловым потоком, равным нулю. На нижней границе расчетной области принималось граничное условие первого рода с температурой, равной начальной температуре, на верхней границе расчетной области принималось граничное условие третьего рода, причем в той части, которая находится под резервуаром, учитывался теплообмен с резервуаром, в остальной части границы расчетной области учитывался теплообмен с атмосферой. Расчеты производились на суперкомпьютере НКС-30Т СО РАН с использованием MPI-технологии параллельного программирования [Корнеев, 2002]. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Некоторые из результатов приведены также в табл. 1–3. Из табл. 1 видно, что охлаждающая система работает в течение зимнего сезона не всегда. Так, из 219 дней с отрицательной температурой 71 день система не работала. Данный эффект связан с разной скоростью изменения температуры в атмосфере и грунте. Если в некоторый момент времени температура в атмосфере поднимется, оставаясь при этом отрицательной, и станет больше температуры в грунте, охлаждающая система выключается, а включается только после того, как температура атмосферы снова станет меньше, чем температура грунта. Из расчетов видно, что продолжительность времени, когда система не работает, составляет 32 % от общей длительности зимнего сезона.

Таблицы 2, 3 показывают, что из 243 дней с отрицательной температурой 74 дня система не работала. Из расчетов следует, что продолжительность времени, когда система не работает, составляет 30 % от общей длительности зимнего сезона. Поскольку это значение не сильно отличается от величины, полученной при посуточном усреднении

Таблица 1. Результаты компьютерного моделирования работы сезонных охлаждающих устройств (период усреднения метеорологических характеристик равен суткам)

Период времени	$T_a, ^\circ\text{C}$	$T_{ис}, ^\circ\text{C}$	$T_{к}, ^\circ\text{C}$	$T_{п}, ^\circ\text{C}$	$N_{пер}$	$N'_{отр}$	$N_{отр}$	$M, \text{кВт}$
Конец ноября 2009 г.	-31,6	-16,93	-18,01	1,73	91	0,5	48	109,19
Конец декабря 2009 г.	-45,5	-25,10	-26,19	0,52	122	1,5	79	114,30
Конец января 2010 г.	-35,6	-25,10	-26,18	-13,46	153	6,5	110	81,67
Конец февраля 2010 г.	-37,7	-27,06	-28,14	-19,36	181	7,5	138	56,57
Конец марта 2010 г.	-6,8	н/р	н/р	-12,74	212	28,7	169	н/р
Конец апреля 2010 г.	-3,1	н/р	н/р	-6,91	242	47,7	195	н/р
Конец мая 2010 г.	1,7	н/р	н/р	-1,98	273	70,7	219	н/р
Конец июня 2010 г.	6,8	н/р	н/р	0,01	303	70,7	219	н/р
Конец июля 2010 г.	15,5	н/р	н/р	0,20	334	70,7	219	н/р
Конец августа 2010 г.	6,1	н/р	н/р	0,33	365	70,7	219	н/р

Примечание к табл. 1–3. T_a – температура атмосферы; $T_{ис}$ – средняя температура испарителей; $T_{к}$ – температура конденсаторов; $T_{п}$ – температура под пеноплексом; $N_{пер}$ – количество суток в рассматриваемом периоде; $N'_{отр}$ – количество суток, когда температура отрицательная, а СОУ не работает; $N_{отр}$ – количество суток, когда температура отрицательная; M – мощность системы охлаждения; н/р – не работает.

Таблица 2. Результаты компьютерного моделирования работы сезонных охлаждающих устройств (период усреднения метеорологических характеристик равен месяцу)

Период времени	$T_a, ^\circ\text{C}$	$T_{ис}, ^\circ\text{C}$	$T_{к}, ^\circ\text{C}$	$T_{п}, ^\circ\text{C}$	$N_{пер}$	$N'_{отр}$	$N_{отр}$	$M, \text{кВт}$
Конец ноября 2009 г.	-21,8	-11,54	-12,62	1,76	91	0	61	83,49
Конец декабря 2009 г.	-35,8	-23,55	-24,64	0,52	122	0	92	106,26
Конец января 2010 г.	-27,3	-21,16	-22,25	-12,84	153	0	123	56,66
Конец февраля 2010 г.	-37,9	-28,81	-29,89	-20,49	181	0	151	62,65
Конец марта 2010 г.	-16,3	-13,78	-14,86	-11,42	212	15	182	15,82
Конец апреля 2010 г.	-7,5	-6,24	-7,33	-4,91	242	43	212	1,73
Конец мая 2010 г.	-2,8	н/р	н/р	-0,65	273	74	243	н/р
Конец июня 2010 г.	8,0	н/р	н/р	0,10	303	74	243	н/р
Конец июля 2010 г.	12,5	н/р	н/р	0,25	334	74	243	н/р
Конец августа 2010 г.	9,3	н/р	н/р	0,37	365	74	243	н/р

Таблица 3. Результаты компьютерного моделирования работы сезонных охлаждающих устройств (период усреднения метеорологических характеристик равен декаде)

Период времени	$T_a, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$N_{\text{пер}}$	$N'_{\text{отр}}$	$N_{\text{отр}}$	$M, \text{кВт}$
Конец ноября 2009 г.	-21,8	-11,54	-12,62	1,76	91	0	61	83,49
Конец декабря 2009 г.	-35,8	-23,55	-24,64	0,52	122	0	92	106,26
Конец января 2010 г.	-27,3	-21,16	-22,25	-12,84	153	0	123	56,66
Конец февраля 2010 г.	-37,9	-28,81	-29,89	-20,49	181	0	151	62,65
Конец марта 2010 г.	-16,3	-13,78	-14,86	-11,42	212	15	182	15,82
Конец апреля 2010 г.	-7,5	-6,24	-7,33	-4,91	242	43	212	1,73
Конец мая 2010 г.	-2,8	н/р	н/р	-0,65	273	74	243	н/р
Конец июня 2010 г.	8,0	н/р	н/р	0,10	303	74	243	н/р
Конец июля 2010 г.	12,5	н/р	н/р	0,25	334	74	243	н/р
Конец августа 2010 г.	9,3	н/р	н/р	0,37	365	74	243	н/р

температуры атмосферы и скорости ветра, можно заключить, что период усреднения не играет большой роли, если величина его меньше месяца.

В результате расчетов было установлено, что охлаждающие системы значительную часть зимнего периода не работают, что является следствием флуктуаций температуры атмосферы.

Литература

Аникин Г.В., Плотников С.Н., Вакулин А.А., Спасенникова К.А. Расчет стабилизации температуры основания под резервуаром с нефтью // Вестн. Тюм. ун-та, 2009а, № 6, с. 35–45.

Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011а, т. XV, № 1, с. 33–39.

Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Стационарные температурные поля в системе «емкость с нефтью–термостабилизаторы грунта» // Криосфера Земли, 2011б, т. XV, № 2, с. 29–33.

Аникин Г.В., Поденко Л.С., Вакулин А.А. Расчет динамики промерзания грунта вокруг вертикального парожидкост-

ного термостабилизатора // Вестн. Тюм. ун-та, 2008, № 6, с. 42–49.

Аникин Г.В., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Теплоперенос в вертикальном парожидкостном термосифоне // Криосфера Земли, 2009б, т. XIII, № 3, с. 54–58.

Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Расчет глубинных охлаждающих устройств // Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвященная XX-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 2011, с. 33–35.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Материалы междунар. конф. «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения». Тюмень, 2008, с. 34–39.

Корнеев В.Г. Параллельное программирование в MPI. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2002, 215 с.

Пиоро И.Л. Эффективные теплообменники на основе двухфазных термосифонов / И.Л. Пиоро, Ф.А. Антоненко, Л.С. Пиоро. Киев, Наук. думка, 1991, 222 с.

Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

Поступила в редакцию
27 октября 2011 г.