

ГЕОТЕРМИКА В СИСТЕМАХ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЙ

Узагальнено досвід використання систем із ґрунтовими теплообмінниками-утилізаторами. Відзначено недостатність існуючих методів теплового розрахунку заглиблених каналів. Виконано систематизацію більш адекватних розрахункових моделей з обґрунтуванням параметрів та режимів роботи геотермальних систем.

Ключові слова: *тепловий потенціал ґрунту, ґрунтові теплообмінники-утилізатори, некоректність математичних моделей, адекватні моделі, режимно-конструктивні параметри.*

Обобщен опыт использования систем с ґрунтовыми теплообменниками-утилизаторами. Отмечается недостаточность обычно рекомендуемых методов теплового расчета заглубленных каналов. Проведено систематизацию более адекватных расчетных моделей с обоснованием параметров и режимов работы геотермальных систем.

Ключевые слова: *тепловой потенциал ґрунта, ґрунтовые теплообменники-утилизаторы, некорректность математических моделей, адекватные модели, режимно-конструктивные параметры.*

An experience in the use of the systems with soil heat-exchanging utilizers has been generalized. It was pointed out the lack of currently available methods for thermal designing of buried channels. More adequate rated models were systematized with substantiation of parameters and geothermal systems states.

Keywords: *heat capacity of ground, ground heat-exchangers, incorrect mathematical models, adequate models, classification regime design parameters.*

Постановка проблеми. Привлечение нетрадиционных энергетических источников является в настоящее время определяющим направлением при разработке энергосберегающих систем микроклимата зданий. Среди многообразия нетрадиционных источников важное место, в связи с доступностью и повсеместностью, занимает ґрунт, особенно его поверхностные слои. Имея практически неограниченную емкость, ґрунт содержит значительные запасы аккумулированной энергии, эффективное использование которой позволяет существенно сократить затраты технических энергоресурсов. В то же время невысокий тепловой потенциал поверхностных слоев (на единицу объема) предъявляет повышенные требования к выбору технических решений и методам их теплового расчета.

Анализ исследований и публикаций. Накоплен достаточный опыт утилизации теплоты ґрунта в теплонасосных системах с ґрунтовыми теплообменниками-испарителями [1 – 4]. Здесь низкопотенциальная энергия ґрунта преобразуется в высокотемпературную энергию теплоносителя местной системы отопления. В послевоенные годы такие системы получили распространение во многих странах. Однако, начиная с 50-х годов, от них начали повсеместно отказываться [4]. Основная причина – невысокий показатель преобразования компрессионных тепловых насосов с электроприводом и, как следствие, большие поверхности ґрунтовых теплообменников. В настоящее время такие системы иногда применяются как альтернатива прямому электрическому нагреву (например, в скандинавских странах для отопления коттеджей, ранее оборудованных электродкотлами) [3]. Их целесообразно также использовать на

промплощадках в случае замены электропривода на дизельный или газовый двигатель и дополнительной утилизации теплоты отработанных газов. В этом случае общий коэффициент полезного действия установки может достигать 85% [3 – 4].

Определенный интерес представляют низкопотенциальные геотермальные системы, выполняющие функции теплового экрана в наружных ограждениях здания [1]. Тепловые потери через ограждения с тепловым экраном существенно снижаются и соответственно снижается энерго- и материалоемкость основной системы отопления. Теплоносителем в такой системе может быть грунтовая вода или вода, нагреваемая в грунтовом теплообменнике под зданием. При этом система может работать в гравитационном режиме. Прогнозируемые показатели таких систем достаточно высокие [1], однако надежность их работы требует экспериментального подтверждения.

Наиболее перспективными, по нашему мнению, являются геотермальные вентиляционные системы (ГВС) с заглубленными воздуховодами-теплообменниками [5 – 8]. В этих системах наружный воздух нагревается в холодное время и охлаждается в теплый период. Такие системы могут использоваться как самостоятельные при невысокой температуре приточного воздуха (например, в животноводческих зданиях) или в качестве первой ступени подогрева вентиляционного воздуха для других зданий.

Основным элементом геотермальных систем является трубчатый (или канальный) теплообменник, закладываемый в грунтовом массиве на определенной глубине. Показателем эффективности грунтового теплообменника обычно служит величина удельного теплосъема с единицы длины или площади. По данным различных исследований линейный теплосъем изменяется в диапазоне 10 – 60 Вт/м длины трубы [9], а поверхностный – в диапазоне 6 – 45 Вт/м² поверхности грунта [3].

Такой разброс имеющихся данных обусловлен, в первую очередь, различием режимных и конструктивных характеристик разных систем.

Наибольший теплосъем обычно наблюдается в начальный период работы установки с последующим снижением к минимуму по истечении определенного промежутка времени. На величину удельного теплосъема большое влияние оказывает также геометрия заглубленных каналов и их взаимное расположение. В частности, с уменьшением сечения каналов (при прочих неизменных условиях) интенсивность удельного теплосъема, как правило, возрастает, достигая максимального значения в случае точечного линейного стока.

С этих позиций часто используемые в расчетных моделях функции линейных источников (стоков) нулевого диаметра [9 – 12] приводят к завышенным результатам. Предлагаемые корректирующие коэффициенты [9] имеются лишь для труб малого диаметра, а поправочные коэффициенты формы [12] – для плоских и близких по форме источников. Причем все виды корректирующих коэффициентов обеспечивают достаточную сходимость расчетных и опытных данных только для отдаленных моментов времени (времени относительной стабилизации теплового режима). Это объясняется тем, что в основу расчетных соотношений по методу линейных источников уже заложен стабилизирующий фактор в виде неизменной температуры поверхности теплообменника или постоянной мощности источника.

Не решенные ранее части общей проблемы. Очевидно, что для каналов значительных размеров (например, в геотермальных вентиляционных системах) и тем более начальных моментов их работы с ярко выраженной нестационарностью (нестабильностью) тепловых

процессов модели линейных источников практически неприемлемы. По этой же причине выбор в качестве показателя тепловой эффективности грунтового теплообменника величины удельного теплосъема без учета его размеров и режима работы также является недостаточно обоснованным.

Цель статьи – систематизация и уточнение более адекватных математических моделей теплового режима грунтовых теплообменников с обоснованием их теплотехнической эффективности и конструктивно-режимных характеристик.

Изложение основного материала. Отличительной особенностью теплового режима грунтовых теплообменников является взаимосвязанность процессов тепломассопереноса в каналах теплообменника и окружающем массиве (сопряженная задача). Математическое описание сопряженного тепломассопереноса должно включать систему уравнений для среды и массива, дополненную условиями сопряжения, а также краевыми условиями (в том числе на внешней поверхности массива) и термодинамическими уравнениями состояния перемещаемой среды.

Решение этой задачи в общем виде связано с преодолением математических трудностей принципиального характера [13]. Решение существенно упрощается, если сопряженную задачу свести к двум отдельным («несвязанным») задачам, приняв в качестве сопрягающей функции заранее неизвестную плотность теплового потока с единицы поверхности заглубленного канала $q(x, \tau)$. Пренебрегая теплопроводностью массива и перемещаемой среды в направлении движения, запишем сопрягающую функцию в виде:
для массива грунта

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} = \alpha [\vartheta(x, \tau) - t(r, \tau)], \quad r = R_0; \quad (1)$$

для перемещаемой среды (при отсутствии внутренних источников и стоков) [13]

$$q(x, \tau) = c_0 \cdot \rho_0 \cdot f_0 \left[\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial \tau} + v \frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} \right] \quad (2)$$

при следующих краевых условиях

$$\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0; \quad (3)$$

$$\vartheta(x, 0) = t_0, \quad (4)$$

где ϑ_0, t_0 – соответственно начальная температура среды на входе в канал ($x=0$) и температура грунта в зоне заложения канала в начальный момент времени ($\tau = 0$). Остальные обозначения даны в конце статьи.

Полная (субстанциональная) производная для перемещаемой среды содержит конвективную надбавку (второе слагаемое в квадратных скобках), что требует двойного интегрирования по временной и пространственной координатам. Для упрощения решения воспользуемся лагранжевыми координатами. Индивидуализируя в этих целях элементарный объем перемещаемой среды во входном сечении канала ($x=0$) и вводя сопутствующую этому объему подвижную систему координат (перемещаемую со скоростью v), получим

$$c_0 \cdot G_0 \frac{d\vartheta(x, \tau^+)}{dx} - q(x, \tau) = 0, \quad (5)$$

где $\vartheta(x, \tau^+)$ – температура перемещаемой среды в сечении x в момент времени $\tau^+ = \tau + x/\nu$. При этом тепловой поток $q(x, \tau)$ с поверхности канала в массив согласно формуле (1) однозначно определяется временем τ от начала теплового возмущения в каждом сечении.

Интеграл уравнения (5) имеет вид

$$\varphi_x = \frac{\vartheta(x, \tau^+) - (R_0, \tau)}{\vartheta_0 - t(R_0, \tau)} = \exp(-St' \cdot \frac{x}{L}), \quad (6)$$

а среднеинтегральная по длине L канала температура перемещаемой среды в тот же момент времени τ^+ определяется из соотношения

$$\bar{\varphi} = \frac{\vartheta(x, \tau^+) - (R_0, \tau)}{\vartheta_0 - t(R_0, \tau)} = \frac{1 - \exp(-St')}{-St'}, \quad (7)$$

где модифицированный критерий Стентона

$$St' = \frac{\alpha \cdot F}{c_0 \cdot G_0} = St \cdot \frac{2L}{R_0} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \cdot \frac{4L}{d_0}, \quad (8)$$

причем для каналов произвольной формы эквивалентный диаметр d_0 принимается равным учетверенному периметру, деленному на площадь поперечного сечения канала.

Для каналов незначительной протяженности и (или) моментов времени, когда $(x/\nu)/\tau \rightarrow 0$, можно принимать $\tau^+ = \tau$.

Особо следует подчеркнуть, что для каналов заданной геометрии и при неизменном расходе перемещаемой среды G_0 относительные избыточные температуры φ_x и $\bar{\varphi}$ суть величины постоянные, в то время как их составляющие изменяются по пространственно-временным или только временным координатам.

С учетом постоянства температурных параметров φ_x и $\bar{\varphi}$ преобразуем сопрягающую функцию (1) к виду

$$-\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} + \bar{\varphi} \cdot \alpha [t(r, \tau) - \vartheta_0] = 0 \text{ при } r = R_0, \quad (9)$$

причем температура теплоносителя в канале принята равной среднеинтегральному значению в тот же момент времени. Такое предположение вполне оправдано, поскольку нивелирует погрешность от принятого ранее допущения о нулевой теплопроводности массива в направлении движения теплоносителя, приближая расчетную величину температурного напора в канале к истинному значению.

Преобразованная сопрягающая функция (9) может теперь рассматриваться как обычное граничное условие для расчета температурного поля массива при «постоянной» температуре теплоносителя в канале, равной ϑ_0 . Дополняющими краевыми условиями должны служить начальное температурное распределение в массиве и соответствующее граничное условие на его дневной поверхности.

Дальнейшее упрощение расчетной модели достигается с учетом следующих соображений. Как уже отмечалось, наибольшая интенсивность теплосъема в грунтовом теплообменнике наблюдается в начальный период работы установки. Продолжительная работа малоэффективна и сопряжена со значительными материальными вложениями на установку. Поэтому более

оправданы сокращенные интервалы рабочих режимов с последующим восстановлением (релаксацией) теплового потенциала грунта. Очевидно, что в течение небольших по продолжительности режимно-восстановительных интервалов зоны теплового влияния подземных каналов на температурное поле прилегающего массива имеют ограниченные размеры.

Ограниченность зоны теплового влияния позволяет, во-первых, использовать в качестве расчетной модель неограниченного пространства; во-вторых, минимизировать глубину заложения и шаг расположения подземных каналов, при которых исключается влияние дневной поверхности массива и соседних каналов; в-третьих, принимать начальную температуру массива равной осредненной температуре в пределах термически активной зоны; наконец, в-четвертых, осреднять температуру теплоносителя на входе в канал за рассматриваемый период.

В такой постановке исходная задача трансформируется в задачу осесимметричного тепломассообмена одиночного канала заданной геометрии в неограниченном массиве с равномерной начальной температурой последнего и постоянной температурой среды в канале [5]. Точное решение выражается несобственным интегралом от сложной комбинации бесселевых функций и реализовано численным методом в виде графиков для различных значений относительной (радиальной) координаты $\bar{r} = r / R_0$.

В статье [6] получено приближенное решение (путем разложения бесселевых функций в ряд), которое удобно представить в модифицированном виде:

для любой точки массива

$$\Theta = \frac{t(r, \tau) - \vartheta_0}{t_0 - \vartheta_0} = 1 - \frac{Bi'}{Bi''} \cdot \frac{(\bar{r})^{-0.5}}{\exp[(\bar{r} - 1) / 2\sqrt{F_0}]^2} \cdot [f(z_1) - f(z_2)]; \quad (10)$$

для поверхностей канала ($\bar{r} = 1$)

$$\Theta_{cm} = \frac{t(R_0, \tau) - \vartheta_0}{t_0 - \vartheta_0} = 1 - \frac{Bi'}{Bi''} \cdot f(z_3), \quad (11)$$

где $Bi' = \bar{\varphi} \cdot Bi$, $Bi'' = Bi' + 0,375$, $f(z)$ – табулированная функция [14], равная

$$f(z) = 1 - \exp z^2 \cdot \operatorname{erfc} z, \quad (12)$$

причем $z_1 = (\bar{r} - 1) / 2\sqrt{F_0} + Bi'' \cdot \sqrt{F_0}$, $z_2 = (\bar{r} - 1) / 2\sqrt{F_0}$, $z_3 = Bi'' \cdot \sqrt{F_0}$.

Результаты расчета по формулам (10), (11) практически соответствуют точному решению [5] в интервале $F_0 \leq 1$. При $F_0 = 10$ погрешность не превышает 5%. Если $F_0 > 10$, необходимо пользоваться этими же зависимостями, принимая $Bi'' = Bi' + 0,3$.

Полученные решения справедливы для неограниченного массива с одиночным каналом. Для правомерности их использования в ограниченном массиве с несколькими каналами найдем взаимосвязь между временным интервалом с момента пуска установки и глубиной заложения теплообменника, при которой влияние дневной поверхности и соседних каналов еще не ощущается. В этих целях рассмотрим отношение $\Delta = (1 - \Theta) / (1 - \Theta_{cm})$ и найдем относительный радиус термически активной зоны $\bar{r}^* = \bar{r}^* / R_0$, при котором отношение Δ меньше заданного значения. Получим

$$\Delta = \frac{(\bar{r}^*)^{-0.5}}{\exp[(\bar{r}^* - 1) / 2\sqrt{F_0}]^2} \cdot \frac{f(z_1) - f(z_2)}{f(z_3)}. \quad (13)$$

Результаты расчета по формуле (13) при $\Delta=0,005(0,5\%)$ аппроксимированы зависимостью

$$\bar{r}^* = 1 + 4,6 \cdot (Bi'')^{0,075} \cdot \sqrt{F_o}, \quad (14)$$

характеризирующей динамику термически активной зоны во всем временном интервале и диапазоне значений критерия $Bi'' = 0 - 10$. При $Bi'' > 10$ показатель степени в формуле (14) следует принимать равным нулю.

Зависимость (14) конкретизирует условия применимости принятой модели неограниченного пространства. Модель справедлива, если относительная глубина заложения подземных каналов $h/R_o > \bar{r}^*$, а относительный шаг их расположения $S/R_o > 2\bar{r}^*$. При нарушении этих условий необходимо дополнительно учитывать влияние дневной поверхности грунта и взаимного расположения каналов. Постановочный алгоритм решения такой задачи изложен в статье [5].

Разработанная математическая модель положена в основу теплового расчета грунтовых теплообменников и оценки их теплотехнической эффективности. Итоговые расчетные соотношения, их обоснование и примеры расчетов приведены в работах [6, 7]. Основные из них следующие: относительная избыточная температура на выходе из подземных каналов

$$\Psi_L = [t(L, \tau) - \vartheta_o] / (t_o - \vartheta_o) = \bar{\varphi} \cdot St' \cdot \Theta_{cm}, \quad (15)$$

где множители $\bar{\varphi}$, St' и Θ_{cm} находятся по формулам (7), (8) и (11) соответственно;

удельный теплосъем с единицы поверхности подземного канала в фиксированный момент времени

$$q(R_o, \tau) = \alpha(t_o - \vartheta_o) \cdot \bar{\varphi} \cdot \Theta_{cm}; \quad (16)$$

общий теплосъем подземным каналом за конечный интервал времени (количество утилизированной теплоты)

$$\Delta Q = 2 \cdot Po' \cdot c \cdot \rho \cdot V(t_o - \vartheta_o) \cdot Bi'' \cdot F_o, \quad (17)$$

где $c \cdot \rho \cdot V$ – сосредоточенная теплоемкость грунта, «заклученного» в объеме V канала;

Po' – критерий Померанцева (модифицированный), равный

$$Po' = 1 - \frac{Bi'}{Bi''} f(z_4), \quad (18)$$

причем $f(z_4) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot Bi'' \sqrt{F_o}} + \frac{f(z_3)}{(Bi'' \sqrt{F_o})^2}$. (19)

Анализ полученных зависимостей показывает, что основными параметрами, влияющими на термоэкономические показатели грунтовых теплообменников, является обобщенный критерий гомохронности $Bi'' \cdot \sqrt{F_o}$ и модифицированный критерий St' . Рекомендательный диапазон их изменения (в частности, для геотермальных вентиляционных систем) ограничивается интервалами 0,50 – 1,25 и 1,5 – 2,5 соответственно. За пределами этих интервалов приведенные затраты на создание и эксплуатацию установки существенно возрастают.

Оптимальная продолжительность работы геосистемы в рабочем режиме, соответствующая указанным пределам обобщающих параметров, определяется интервалом

$$\sqrt{F_o} = (1,5 \div 3)(1 + Bi'')^{-1}, \quad (20)$$

за пределами которого слева наблюдается резкое возрастание эксплуатационных расходов, а справа – значительное увеличение

капитальных вложений. Причем относительная длина заглубленных каналов с гладкими поверхностями должна подчиняться условию

$$L / R_o = (30 \div 40) \cdot Re^{0.2} . \quad (21)$$

Более продолжительная работа системы в рабочем режиме приводит к ощутимому снижению теплосъема и конечной температуры теплоносителя. Для поддержания последней на заданном уровне требуется значительное увеличение площади грунтового теплообменника, а также глубины его заложения. Поэтому более экономичной, как уже отмечалось, является прерывистая работа системы с периодическим восстановлением (релаксацией) теплового потенциала прилегающих слоев грунта.

Математическая модель теплового режима грунтового теплообменника при пассивном восстановлении теплового потенциала охлажденных слоев только за счет контактной теплопроводности с основным массивом изложена в статье [8]. Модель описывает динамику температурных полей термически активной зоны при многократном включении-отключении установки. Показано, что пассивное восстановление (при одинаковой продолжительности рабочих и восстановительных периодов) приводит к монотонному снижению температуры грунта в зоне заложения теплообменника и, как следствие, к снижению эффективности установки.

Для повышения эффективности более целесообразна активная тепловая зарядка охлажденных слоев от других энергетических источников (например, вытяжным воздухом в геотермальных вентиляционных системах). В этом случае наблюдается двухстороннее восстановление отработанного потенциала грунта: контактной теплопроводностью со стороны основного массива и конвективно-контактным теплопереносом со стороны удаляемого теплого воздуха. Продолжительность восстановительного периода при этом существенно укорачивается, а рабочего соответственно возрастает.

Такая система предложена в работе [15]. Компонуется она из отдельных вентиляционных модулей, попеременно работающих в приточном и вытяжном режимах. При работе модуля в вытяжном режиме утилизируется не только явная, но и скрытая теплота удаляемого воздуха, что еще более повышает тепловой потенциал грунта и теплоэнергетическую эффективность установки в целом.

Математическая модель теплового режима грунтового теплообменника при активной тепловой зарядке массива также разработана. Эта модель является наиболее общей, включает, как частный случай, модель пассивного восстановления и требует отдельного изложения.

Выводы:

1. Грунт содержит значительные запасы аккумулированной энергии. Однако невысокая температура поверхностных слоев предъявляет повышенные требования к выбору технических решений и методике их расчета.

2. В частности, теплонасосные установки с грунтовыми теплообменниками оправданы лишь в случае замены электропривода на дизельный или газовый двигатель с дополнительной утилизацией теплоты отработанных газов.

3. Наиболее перспективными, по нашему мнению, являются геотермальные вентиляционные системы с ограниченной (оптимальной) продолжительностью рабочих и восстановительных режимов.

4. Математические модели теплового режима грунтовых теплообменников на основе линейных источников (стоков) не учитывают геометрии каналов и дают удовлетворительные результаты лишь для

отдаленных моментов времени с относительно установившимся тепловым режимом теплообменника.

5. Более адекватными являются модели на основе сопрягающих функций для перемещаемой среды и грунтового массива и полученных из них расчетных соотношений.

6. Расчетный комплекс обеспечивает возможность оптимизации конструктивных параметров геотермальных систем и режимов их работы.

7. Комбинированные методы восстановления теплового потенциала охлажденного грунта сокращают продолжительность восстановительных режимов, повышая тем самым термoeкономические показатели системы в целом.

Обозначения:

t – температура массива; ϑ – температура теплоносителя; x – координата (осевая); r – координата (радиальная); τ – время; R_o – радиус (эквивалентный по скорости) канала; L – длина канала; q – плотность теплового потока; c – теплоемкость грунта; c_o – теплоемкость теплоносителя; G_o – массовый расход теплоносителя; v – скорость теплоносителя; r^* – радиус термически активной зоны; f_o – площадь сечения канала; F – площадь теплообмена канала; λ – коэффициент теплопроводности массива; V – объем канала; Nu , Re , Pr , St , Po – критерии соответственно Нуссельта, Прандтля, Стентона, Померанцева; Bi – критерий Био; Fo – число Фурье; $Bi \sqrt{Fo}$ – модифицированный критерий гомохронности; St' – модифицированный критерий Стентона.

Литература

1. Богословский В.Н. Отопление/ В.Н. Богословский, А.Н. Сканиви. – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.
2. Мартыновский В. С. Тепловые насосы/ В.С. Мартыновский. – М. – Л.: Машигиз, 1955. – 243 с.
3. Хайнрих Г. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения/ Г. Хайнрих, Х. Найорк, В. Нестлер; пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1985. – 351 с.
4. Рей Д. Экономия энергии в промышленности/ Д. Рей; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
5. Богословский В.Н. К расчету теплового режима геотермальных вентиляционных систем/ В.Н. Богословский, Э.Н. Кривобок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – №6. – С. 92 – 96.
6. Богословский В. Н. Теплотехническая эффективность геотермальных вентиляционных систем/ В.Н. Богословский, Э.Н. Кривобок // Водоснабжение и сантехника. – 1987. – №1. – С. 12 – 13.
7. Богословский В. Н. Теплотехнические аспекты утилизации теплоты грунта в геотермальных системах зданий/ В.Н. Богословский, Э.Н. Кривобок // Теплообмен. – ММФ. Теплообмен в энергетических и химико-технологических устройствах: избранные доклады. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1989. – Секции 10, 11. – С. 73 – 81.
8. Кривобок Е. М. Релаксація температурного поля масиву із циліндричним джерелом при його відключенні/ Е.М. Кривобок, О.Е. Ілляш // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 7. – Полтава: ПолтНТУ, 2001. – С. 95 – 99.
9. Ингерсолл Л. Р. Теплопроводность, ее применение в технике и геологии/ Л.Б. Ингерсолл, О.Дж. Зобель, А.К. Ингерсолл; пер. с англ. – М. – Л.: Машигиз, 1959. – 217 с.
10. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики/ А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
11. Карслоу Х. С. Теплопроводность твердых тел / Х.С. Карслоу, Д.К. Егер; пер. с англ. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

12. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
13. Лыков А.Л. Тепломассообмен. Справочник/ А.Л. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
14. Справочник по специальным функциям / под редакцией М. Абрамовица, И. Стигана; пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 830 с.
15. Кривобок Е.М. Комплексні (багатоступеневі) безпаливні системи/ Е.М. Кривобок, О.Е. Ілляш // Каталог сучасних наукових розроблень. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С. 122.

Надійшла до редакції 29.03.. 2010

© Э.Н. Кривобок