

фективности электроснабжения таких систем является задачей, требующей специального подхода и решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розинский Д.И., Тимченко Н.П., Круковский П.Г. Электротеплоаккумуляционное отопление греющим полом. – К.: НПП “Элетер”, 2001. – С. 31–46.
2. Круковский П.Г., Розинский Д.И., Тимченко Н.П., Судак О.Ю. Численное моделирование теплового состояния греющих полов с элект-

рокабельным отоплением (стационарная поставка). – К.: НПП “Элетер”, 2001. – С. 92–99.

3. *Справочник по комфортным теплым полам.* Технический справочник. – М.: Тусо Thermal Controls, 2008. – 32 с.

4. Шульга Ю.И., Розинский Д.И., Громадский Ю.С., Долинский А.А., Круковский П.Г., Тимченко Н.П., Шевелев В.Б., Черных Л.Ф., Полевой П.П. Электроотопление как составляющая европейского пути развития систем отопления в Украине. – К.: НПП “Элетер”, 2001. – С. 16–30.

Получено 18.08.2008 г.

УДК 621.577 + 697.1

ЖОВМИР Н.М.

Институт технической теплофизики НАН Украины

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ КАК ПРЕДПОСЫЛКА ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ КОТЛОВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Для існуючого будинку розглянуто потоки теплових втрат та потоки теплої від нагрівальних приладів до та після його теплової ізоляції. Показано, що при виконанні теплової ізоляції існуючих будівель доцільно зменшувати температуру теплоносія в їх системах опалення. Перехід до низькотемпературних режимів систем опалення забезпечує більш сприятливі умови для застосування конденсаційних котлів та теплових насосів. Показано, що зменшення теплових втрат будинку на 36% з переведенням існуючої системи опалення на нижчі температури теплоносія забезпечує зменшення споживання електричної енергії привідним двигуном теплового насоса у два рази.

Для существующего здания рассмотрены потоки тепловых потерь и потоки теплоты от нагревательных приборов до и после его тепловой изоляции. Показано, что при теплоизоляции существующих зданий целесообразно уменьшать температуру теплоносителя в их системах отопления. Переход к низкотемпературным режимам систем отопления обеспечивает более благоприятные условия для применения конденсационных котлов и тепловых насосов. Показано, что снижение тепловых потерь здания на 36 % с переводом существующей системы отопления на пониженные температуры теплоносителя обеспечивает снижение потребления электрической энергии приводным двигателем теплового насоса в два раза.

For an existing building, we study its heat losses and heat flows from heating devices for the states before and after its heat insulation. It is shown that, at heat insulation of existing buildings, it is reasonable to decrease the heat carrier temperature in their heating systems. Transition to low temperature modes of heating systems provides more favorable conditions for the application of condensing boilers and heat pumps. It is shown, that a decrease in the building thermal loss by 36% with adjusting the existing heating system for lower temperatures of the heat carrier cuts in half the electricity consumption to drive the heat pump.

C_p – теплоемкость теплоносителя в системе отопления;

F_h – площадь поверхности нагрева отопительных приборов;

k_h – коэффициент теплопередачи отопительных приборов;

m_w – расход теплоносителя через отопительные приборы;

Q_h – поток теплоты от нагревательных приборов к воздуху здания;
 Q_{los} – поток тепловых потерь здания;
 Q_w – поток теплоты, отбираемой от теплоносителя в нагревательных приборах;
 T_1 – температура нагреваемой среды;
 T_2 – температура среды – источника низкотемпературной теплоты;
 t_a – температура наружного воздуха;
 t_b – расчетная температура воздуха в отапливаемом здании;
 $t_w^{\rightarrow}, t_w^{\leftarrow}$ – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы отопления;

ε – коэффициент преобразования реального теплового насоса;
 ε_K – коэффициент преобразования идеального теплового насоса;
 $\eta_{oe,TH}$ – относительный эффективный КПД теплового насоса;
 η_{em} – электромеханический КПД привода и компрессора теплового насоса;
 $\eta_{oi,TH}$ – внутренний относительный КПД теплового насоса;

Индексы нижние:

1 – до реконструкции здания;
 2 – после реконструкции здания.

Актуальной задачей коммунальной энергетики Украины является переход к применению высокоэффективных котельных установок, работающих на природном газе, расширение использования возобновляемых источников энергии и местных топлив. Ознакомление с опытом Европейских стран побуждает интерес к использованию тепловых насосов для отопления. Широкое применение тепловых насосов в системах теплоснабжения предусмотрено “Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года и дальнейшую перспективу”.

Действующими строительными нормами установлены технические нормативы, обеспечивающие техническую совместимость систем отопления зданий [1], тепловых сетей [2] и источников теплоснабжения [3]. Прежде всего это касается показателей качества теплоносителя и особенно его температуры, причем нормативами установлены ее предельные значения. В существующей практике установленные предельные значения температуры теплоносителя приняты за повсеместную норму – системы отопления жилых зданий рассчитывают на максимально допустимое значение температуры воды в подающем и обратном трубопроводах 95 °С/70 °С (при пластмассовых трубопроводах 90 °С/70 °С).

В зарубежной практике распространены низкотемпературные системы отопления, при этом производятся отопительные котлы для работы по температурному графику 80 °С/60 °С, 75 °С/60 °С, 50 °С/30 °С и даже 40 °С/30 °С. Если водогрейные котлы, рассчитанные на работу по темпера-

турному графику 90 °С/70 °С, имеют коэффициент полезного действия 92... 93%, то котлы, работающие по температурному графику 80 °С/60 °С, – до 96...98%. При снижении температуры обратной воды ниже 57...60 °С отопительные котлы работают в конденсационном режиме с конденсацией водяного пара из продуктов сгорания природного газа с достижением коэффициента полезного действия 103...104% при температурном графике 50 °С/30 °С и 108...110% – при 40 °С/30 °С. Многие фирмы зарубежных стран производят конденсационные котлы мощностью до 1500 кВт, в Украине – от 45 до 280 кВт [4, 5].

Как низкотемпературные системы, так и конденсационные котлы дороже обычных, поэтому их внедрение поддерживается государствами. Например, в Канаде с 2007 года размер инвестиционной поддержки составляет от 15 до 23 канадских долларов на киловатт тепловой мощности конденсационного котла в зависимости от его эффективности. При внедрении котлов мощностью более 380 кВт наибольшая поддержка предоставляется при использовании оборудования фирм “De Dietrich”, “Buderus”, “Viessman”, “Raypack” [5].

Отечественный и зарубежный опыт подтверждает, что для эффективного применения тепловых насосов необходимы низкотемпературные системы отопления. Поэтому сложившаяся в Украине практика строительства зданий с высокотемпературными системами отопления является препятствием на пути повышения эффективности коммунальной энергетики за счет широкого

внедрения тепловых насосов, низкотемпературных и конденсационных котлов с глубокой утилизацией теплоты продуктов сгорания.

В условиях Украины переход к применению низкотемпературных систем отопления и теплоснабжения может быть реализован одновременно с улучшением теплоизоляционных свойств зданий. Если в середине 1990-х годов широко обсуждалась тема о необходимости тепловой изоляции зданий, то в настоящее время утепление зданий становится повсеместной практикой, выполняемой владельцами зданий без предписаний и агитации – с ростом стоимости энергоресурсов экономить энергию становится выгодно. Тепловая санация зданий обеспечивает снижение потребления тепловой энергии, но в то же время при надлежащем подходе ее можно использовать для перехода к пониженным температурам теплоносителя в системе отопления. Если не скорректировать температурный график системы отопления, то потенциальная экономия тепловой энергии, которую может обеспечить теплоизоляция зданий, может быть растратчена на перегрев помещений и усиленное проветривание.

Рассмотрим теплотехнические показатели здания и его системы отопления до и после тепловой изоляции. Для упрощения можно считать, что поток тепловых потерь здания Q_{los} компенсируется потоком теплоты от установленных нагревательных приборов Q_h , за счет отбора теплового потока Q_w от теплоносителя системы отопления, т.е.

$$Q_{los} = Q_h = Q_w. \quad (1)$$

Для здания до реконструкции можно записать уравнения:

- для теплового потока, отдаваемого от отопительных приборов к воздуху внутри здания:

$$Q_{h1} = k_h F_h \left(\frac{t'_{w1} + t''_{w1}}{2} - t_b \right); \quad (2)$$

- для теплового потока, отдаваемого теплоносителем в отопительных приборах:

$$Q_{w1} = m_w C_p (t'_{w1} - t''_{w1}). \quad (3)$$

Полагаем, что при реконструкции здания поверхность нагрева отопительных приборов F_h и расход теплоносителя m_w через них не изменяют. Пренебрегая возможным изменением коэффициента теплопередачи k_h , уравнения для определения тепловых потоков для реконструированного здания можно записать в виде:

$$Q_{h2} = k_h F_h \left(\frac{t'_{w2} + t''_{w2}}{2} - t_b \right), \quad (4)$$

$$Q_{w2} = m_w C_p (t'_{w2} - t''_{w2}). \quad (5)$$

Из рассмотрения уравнений (1) – (5) можно определить необходимые температуры теплоносителя в подающем t'_{w2} и обратном t''_{w2} трубопроводах системы отопления после тепловой изоляции здания:

$$t''_{w2} = t_b + \frac{Q_{los2}}{Q_{los1}} (t''_{w1} - t_b), \quad (6)$$

$$t'_{w2} = t''_{w2} + \frac{Q_{los2}}{Q_{los1}} (t'_{w1} - t''_{w1}). \quad (7)$$

Из рассмотрения уравнений (6) и (7) можно сделать вывод, что со снижением тепловых потерь здания требуемые температуры теплоносителя в системе отопления снижаются, т.е. $t'_{w2} < t'_{w1}$ и $t''_{w2} < t''_{w1}$. Так, при значительном снижении тепловых потерь здания $Q_{los2}/Q_{los1} \leq 0,7$, система отопления, ранее работавшая по температурному графику 90 °С/70 °С, может быть переведена на работу по низкотемпературному графику 70 °С/55 °С, который обеспечивает возможность применения конденсационных котлов в течение всего отопительного сезона.

При умеренном уменьшении тепловых потерь здания $Q_{los2}/Q_{los1} \leq 0,7$ даже небольшое снижение расчетного температурного графика системы отопления остается привлекательным, поскольку в обратном трубопроводе системы отопления температура воды может снижаться ниже 60...57 °С в течение более продолжительной части отопительного периода, что расширяет возможности для применения конденсационных котлов или систем глубокой утилизации теплоты продуктов сгорания.

Применение тепловых насосов для теплоснабжения здания до и после тепловой санации здания имеет ряд существенных отличий. Во-первых, после тепловой санации уменьшается необходимая тепловая мощность теплового насоса, поскольку $Q_{los2} < Q_{los1}$. Во-вторых, требуемые температуры теплоносителя в системе отопления снижаются, т.е. $t'_{w2} < t'_{w1}$ и $t''_{w2} < t''_{w1}$. Ввиду особенностей процесса термодинамического производства тепловой энергии, указанные факторы обеспечат существенное повышение эффективности применения тепловых насосов для отопления здания после его тепловой санации.

Для реального теплового насоса коэффициент преобразования можно определить как произведение коэффициента преобразования идеального теплового насоса, работающего по обращенному циклу Карно, на эффективный коэффициент полезного действия реальной машины [6]:

$$\varepsilon = \eta_{oe,th} \varepsilon_K = \eta_{oe,th} T_1 / (T_1 - T_2), \quad (8)$$

где

$$\eta_{oe,th} = \eta_{em} \eta_{oi,th};$$

$$T_1 = t'_w + 273, \text{ К.}$$

В уравнении (8) коэффициент преобразования идеального теплового насоса характеризует внешние термические условия применения теплового насоса. Относительный эффективный КПД $\eta_{oe,th}$ характеризует техническое совершенство теплового насоса и показывает насколько реальное устройство менее эффективно по сравнению с теоретически возможным значением.

После тепловой санации здания требуемая температура воды в подающем трубопроводе уменьшается, т.е. уменьшается T_1 , что ведет к улучшению внешних термических условий и увеличению коэффициента преобразования идеального теплового насоса.

В работе [6] указывается, что для компрессионных холодильных машин и тепловых насосов характерна сложная зависимость относительного коэффициента полезного действия от температуры кипения и конденсации. В реальной теплосна-

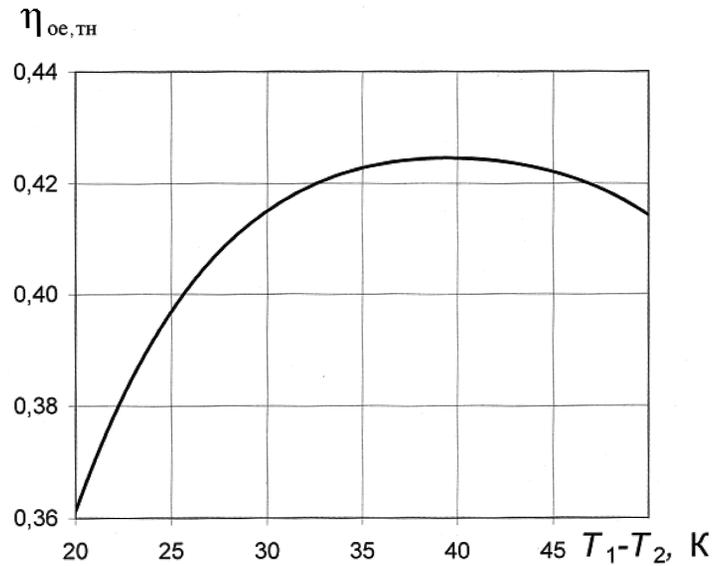


Рис. 1. Изменение относительного эффективного КПД теплового насоса класса “вода-вода” в зависимости от разности температур $T_1 - T_2$ при $T_2 = 293 \text{ К}$.

сосной системе отопления, где возможности выбора нижнего источника теплоты ограничены, зачастую доступен единственный источник, который в благоприятных условиях имеет постоянную температуру. Для теплонасосных систем отопления более характерным может быть изменение требуемой температуры подогрева теплоносителя в соответствии с температурным графиком работы системы. При этом переменной будет разность температур нижнего и верхнего источников теплоты $T_1 - T_2$. Возникает вопрос — насколько изменение разности температур влияет на эффективный КПД теплового насоса.

По техническим характеристикам реального теплового насоса МУКОМ-MWW-532-LMF класса “вода-вода”, приведенным в [7], определены значения относительного эффективного КПД $\eta_{oe,th}$ при постоянном значении температуры воды T_2 на входе в испаритель теплового насоса при изменении температуры нагретой воды T_1 на выходе из его конденсатора, т.е. изменении $T_1 - T_2$. Полученные результаты приведены на рис. 1.

Из представленных данных видно, что для реального теплового насоса значение относительного эффективного коэффициента полезного действия находится в диапазоне 0,36...0,43. Наи-

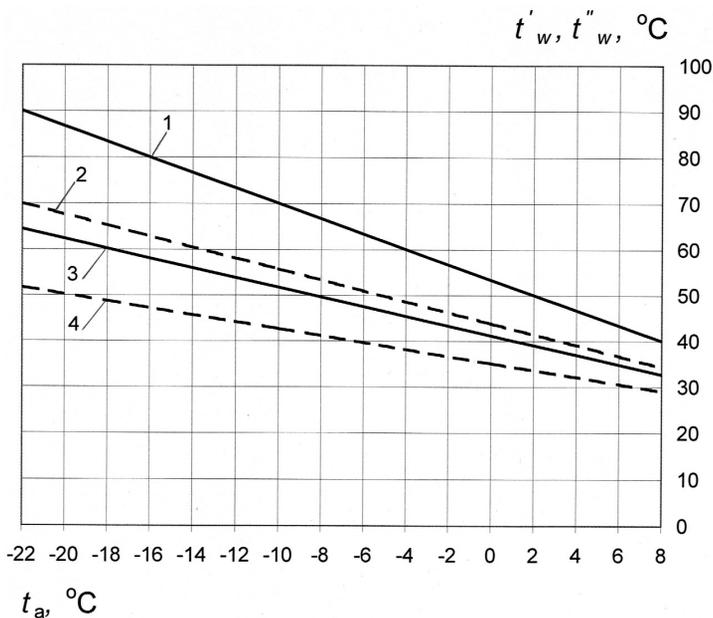


Рис. 2. Температурный график системы отопления дома в зависимости от текущей температуры наружного воздуха:

1, 2 – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах до реконструкции здания; 3, 4 – возможная температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах после реконструкции здания.

большее значение относительного эффективного КПД достигается при разности температур холодного и горячего источников около 40 градусов, причем как повышение разности температур, так и ее снижение приводят к снижению относительного эффективного КПД.

При применении тепловых насосов целесообразна их эксплуатация на расчетном режиме при максимальных значениях $\eta_{\text{о.тн}}$. При повышении разности температур $T_1 - T_2$ эксплуатация теплового насоса с пониженными значениями $\eta_{\text{о.тн}}$ является особенно неблагоприятной, поскольку совпадает с ухудшением внешних термических условий его работы. При снижении разности температур уменьшение $\eta_{\text{о.тн}}$ компенсируется ростом теоретического коэффициента преобразования благодаря улучшению термических условий. В связи с этим можно сказать, что снижение требуемой температуры теплоносителя может иметь благоприятное влияние и на относительный эффективный КПД теплового насоса.

Используя приведенные выше формулы и данные о характеристиках теплового насоса, по известным зависимостям можно оценить затраты электрической энергии на привод теплового насоса, обеспечивающего теплотой здание до и после тепловой санации.

Для демонстрации изложенного рассматривается описанная в литературе реконструкция жилого дома серии 96 – одной из самых распространенных в Украине. Расчеты выполнены для 9-этажного 143-квартирного жилого дома общей площадью 7760 м². При расчетной наружной температуре минус 22 °С до реконструкции дома тепловая мощность системы отопления составляла 685 кВт. При реконструкции дома его тепло-технические показатели доводят до современных требований путем замены окон с увеличением их термического сопротивления с 0,42 до 0,50 м²·К/Вт, утепления стен – с 0,83 до 2,5 м²·К/Вт, утепления чердачного перекрытия – с 1,15 до 2,7 м²·К/Вт, утепления перекрытия над техническим подпольем – с 0,92 до 2,3 м²·К/Вт. В результате реконструкции требуемая тепловая мощность системы отопления снижается до 435 кВт [8].

Полагаем, что до реконструкции дома его система отопления работала по температурному графику 90 °С/70 °С и в здании поддерживалась температура $t_b = 20$ °С. При выполнении расчетов использовались климатологические данные о повторяемости температур наружного воздуха для г. Запорожье [9].

При расчетной температуре наружного воздуха минус 22 °С до реконструкции здания источник теплоснабжения обеспечивал расчетную тепловую мощность 685 кВт при расчетных температурах теплоносителя 90 °С/70 °С. Если при реконструкции здания рассматриваемого жилого дома система отопления и расход теплоносителя в ней не изменялись, то тогда в соответствии с уравнениями (8) и (9) необходимо обеспечить работу системы по температурному графику 64 °С / 51 °С (рис. 2).

Предположим, что рассматривается организация отопления этого дома с помощью теплового насоса и в качестве источника низкопотенциальной теплоты имеется вода с температурой 20 °С. В рассматриваемом примере температура источника низкопотенциальной теплоты равна требуе-

мой температуре в отапливаемом здании. Это значит, что температурный напор, создаваемый тепловым насосом, будет тратиться на обеспечение температурных условий функционирования системы передачи теплоты.

В качестве источника теплоснабжения рассматривается комбинированная установка в составе резервного/пикового газового водогрейного котла и среднетемпературного теплового насоса, утилизирующего теплоту воды с температурой 20 °С и производящего теплоноситель с максимальной температурой до 70 °С. При выполнении расчетов теплонасосной системы отопления здания приняты технические характеристики среднетемпературного теплового насоса МУКОМ-MWW-532-LMF класса “вода-вода” с винтовым компрессором тепловой мощностью до 600 кВт [7].

До реконструкции дома тепловой насос может обеспечивать необходимую тепловую мощность и температуру теплоносителя при температурах наружного воздуха от 8 °С до минус 10 °С, при этом его коэффициент преобразования снижается от 6,0 до 3,0. При температуре наружного воздуха минус 10 °С может быть достигнута максимальная тепловая мощность теплового насоса – 489 кВт и потребляемая электрическая мощность на его привод 163 кВт. При дальнейшем снижении температуры наружного воздуха тепловой насос обеспечивает предварительный подогрев обратной сетевой воды до 70 °С с постепенным снижением его тепловой мощности. Пиковый котел обеспечивает дальнейший подогрев воды до требуемой температуры. При температуре наружного воздуха минус 22 °С и ниже температура обратной воды поднимается до 70 °С, поэтому тепловой насос отключается, и всю тепловую нагрузку 685 кВт должен обеспечивать пиковый котел, подогревая воду от 70 °С до 90 °С.

До реконструкции дома за отопительный сезон потребление тепловой энергии на отопление составит 1359 МВт·ч, из них 1260 МВт·ч (почти 93%) может вырабатывать тепловой насос и 98 МВт·ч (7%) – пиковый котел. За отопительный сезон потребление электрической энергии на привод теплового насоса составит 300 МВт·ч, а средний коэффициент преобразования теплового насоса будет 4,20.

После реконструкции дома тепловой насос может обеспечивать необходимую тепловую мощность при всех температурах наружного воздуха, а газовый котел будет находиться в качестве резервного источника теплоты. Можно полагать, что в этом случае требуемая тепловая мощность теплового насоса и резервного котла должна составлять по 435 кВт. При температурах наружного воздуха от 8 °С до 0 °С, когда требуемая температура подогрева воды составляет от 31 до 40 °С соответственно, тепловой насос может работать с максимально возможным коэффициентом преобразования 6,0. С дальнейшим понижением температуры наружного воздуха до минус 22 °С требуемая температура подогрева воды возрастет до 64 °С, при этом необходимая тепловая мощность теплового насоса возрастает до 435 кВт с увеличением потребляемой электрической мощности до 128 кВт, а коэффициент преобразования снижается до 3,4.

После реконструкции дома за отопительный сезон потребление тепловой энергии на отопление составит 816 МВт·ч, причем 100 % тепловой энергии может вырабатывать тепловой насос. За отопительный сезон потребление электрической энергии на привод теплового насоса составит 152 МВт·ч, а средний коэффициент преобразования – 5,36.

Рассмотренный пример иллюстрирует важность улучшения теплотехнических характеристик здания до внедрения теплонасосной системы отопления. В рассмотренном примере доведение теплотехнических характеристик здания до современных требований со снижением расчетных тепловых потерь здания на 36 % обеспечивает возможность перехода к низкотемпературному режиму работы системы отопления. В результате этого становится возможным полное покрытие отопительной нагрузки здания с помощью теплового насоса при снижении потребления электрической энергии в два раза.

Выводы

Можно ожидать, что массовая реконструкция зданий с повышением их теплоизоляционных характеристик и переходом к низкотемпературным режимам работы систем отопления расширит возможности применения конденсационных

котлов и обеспечит коренное улучшение энергетической и экономической эффективности применения тепловых насосов в системах отопления и централизованного теплоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *СНиП 41-01-2003* Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: Госстрой России, 2004. – 54 с.
2. *СНиП 2.04.07-86* Тепловые сети. – М.: Госстрой СССР, 1988. – 48 с.
3. *ГОСТ 30735-2001* Межгосударственный стандарт. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт. Общие технические условия. – 16 с.
4. *Конденсационные* напольные котлы / Колви-Украина. – <http://www.kolvi.com>.
5. *Condensing boiler and direct contact system. Equipment list* / Datech Group – 2007. – <http://cws.gazmetro.com>
6. *Соколов Е.Я., Бродянский В.М.* Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
7. *Промышленный* высокотемпературный тепловой насос. – Маэкава МФГ Ко., ЛТД – Маэкава Сейсакусё. – 12 с.
8. *Украина: Энергосбережение в зданиях.* – ЕС-Energy Centre Kiev. – 274 с.
9. *СНиП II-A.6-72* Строительная климатология и геофизика. – М.: Госстрой СССР, 1973. – 320 с.

Получено 15.05.2008 г.