



УДК 697.9

В.А. Бройда – кандидат технических наук, доцент
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЧИЛЛЕРА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСХОДА ХОЛОДНОЙ ВОДЫ

АННОТАЦИЯ

Рассчитываются годовые затраты электроэнергии на работу чиллера с естественным охлаждением и регулированием расхода холодной воды. Учитываются поступления теплоты в помещения, климатические условия, режим работы. Определяются длительности периодов потребления холода, эффективность естественного охлаждения с регулированием расхода, рациональные инвестиции в оборудование.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Чиллер, естественное охлаждение, регулирование расхода, эффективность.

V.A. Broyda – candidate of technical science, associate professor
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUA)

CHILLER'S EFFICIENCY WITH FREE-COOLING UNDER COLD WATER FLOW REGULATION

ABSTRACT

The annual power consumption for chiller operation with free-cooling and cold water flow regulation is calculated. Heat input, climatic conditions and operation modes are taken into consideration. The length of cold consumption periods, free-cooling efficiency with flow regulation, and rational investments into equipment are determined.

KEYWORDS: Chiller, free-cooling, regulation of flow, efficiency.

Введение

Чиллеры – водоохлаждающие холодильные машины, используемые в системах кондиционирования воздуха, являются наиболее дорогими агрегатами инженерного оборудования здания и крупными потребителями электрической энергии. Естественное охлаждение (Free Cooling – FC) применяется в чиллерах для экономии затрат электроэнергии. Сущность FC заключается в том, что при температуре наружного воздуха ниже, чем температура обратной (отопленной) воды, отключается холодильная машина и циркулирующая вода охлаждается в дополнительном теплообменнике наружным воздухом. Такой чиллер дороже, для его круглогодичной работы применяется не вода, а антифриз – обычно 30 ÷ 40 % раствор этиленгликоля.

При фиксированных температуре и расходе жидкости температурные условия применения FC ограничены, невелика выгода от его использования. Для расширения этих условий можно соответственно снижению нагрузки чиллера рационально уменьшать расход жидкости. Тогда повышается её температура в обратной линии, расширяются температурные границы применения, возрастает эффективность FC. При таком регулировании снижаются затраты энергии на работу циркуляционного насоса.

Целью данного исследования является энергетическая и экономическая оценка эффективности использования чиллеров с естественным охлаждением в годовом цикле при использовании регулирования расхода холодной воды.

Основная часть

Для достижения цели исследования следует: применить соответствующую климатическую модель; применить адекватное описание изменения нагрузки чиллера; выразить потребление электроэнергии основными устройствами чиллера; связать экономию электроэнергии с обоснованными инвестициями в FC.

Приближенной климатической моделью может служить описание годового изменения среднесуточной температуры наружного воздуха

$$t = t_r + A \cdot \cos(z), \quad (1)$$

где t_r , A – соответственно, среднегодовое значение и амплитуда отклонения температуры, величины которых могут устанавливаться по данным [1], °C; z – безразмерная переменная времени $z = Z \cdot 2\pi / 365$; Z – время, отсчитываемое от годового максимума температуры, сут.



В описании нагрузки чиллера следует указать: постоянные поступления теплоты технологические, от освещения и др.; затраты холода на охлаждение вентиляционного воздуха; трансмиссионные теплопритоки (или теплопотери) через наружные ограждения. Тогда нагрузка чиллера определяется из уравнения теплового баланса

$$\Delta Q = Q - L \cdot c \cdot r \cdot (t_B - t_{II}) - 3,6 \cdot q \cdot V \cdot (t_B - t), \quad (2)$$

где Q – теплоступления в помещения от оборудования, людей и других источников, кДж/ч; L – расход вентиляционного воздуха, м³/ч; c , r – соответственно, теплоемкость и плотность воздуха, $c = 1,005$ кДж/(кг·°C), $r = 1,2$ кг/м³; t_B , t_{II} – соответственно, температуры внутреннего и приточного воздуха, °C; q – удельная тепловая характеристика здания, Вт/(м³·°C); V – объем охлаждаемых помещений, м³.

Температура приточного воздуха совпадает с температурой наружного воздуха до некоторого значения t_{II} , которое ограничивается способом воздухораспределения.

Если $t \geq t_{II}$, то $t_{II} = t$, если $t < t_{II}$, то $t_{II} = t_{II}$.

Чиллер выбирается по нагрузке, соответствующей максимальным избыткам теплоты ΔQ_{MAX} , которые наблюдаются при максимальной температуре наружного воздуха, $t_{MAX} = t_G + A$. Этому состоянию соответствуют температуры холодной и обратной жидкости t_{W10} и t_{W20} . Максимальный расход жидкости G_{WMAX} составляет:

$$G_{WMAX} = \Delta Q_{MAX} / (c_W \cdot (t_{W20} - t_{W10})), \quad (3)$$

где c_W – теплоемкость жидкости, для воды $c_W = 4,19$ кДж/(кг·°C), для 30 % раствора этиленгликоля = 3,5 кДж/(кг·°C).

Можно сформулировать условия рационального изменения расхода жидкости: температура холодной воды постоянна $t_{W1} = t_{W10} = const$; разность температур воздуха в помещениях и обратной жидкости изменяется пропорционально меняющейся нагрузке чиллера, откуда:

$$t_{W2} = t_B - (t_B - t_{W20}) \cdot \Delta Q / \Delta Q_{MAX}. \quad (4)$$

Тогда переменный расход холодной воды определится выражением:

$$G_W = \Delta Q / (c_W \cdot (t_{W2} - t_{W1})). \quad (5)$$

Номинальная холодопроизводительность FC – Q_{FCO}

обычно приводится при определенной температуре наружного воздуха t_{FCO} и температуре обратной жидкости t_{WFCO} . При иных температурных условиях холодопроизводительность собственно FC (теплообменника FC) можно оценить с помощью выражения:

$$Q_{FC} = Q_{FCO} \cdot (t_{W2} - t) / (t_{WFCO} - t_{FCO}). \quad (6)$$

Возможны три режима работы чиллера с FC:

1 – режим работы холодильной машины при температуре наружного воздуха выше, чем температура обратной жидкости, когда использование FC невозможно. Этот режим реализуется в диапазоне температуры наружного воздуха от t_{MAX} до некоторой температуры t_1

$$t_1 = t_{W2} - (2 \div 3); \quad (7)$$

2 – смешанный режим, используется и FC, и частично холодильная машина, когда с помощью только FC невозможно устранить имеющиеся избытки теплоты. Он реализуется в диапазоне температур наружного воздуха от t_1 до некоторой температуры t_2 .

Граничная температура t_2 определяется условием

$$Q_{FC} = \Delta Q; \quad (8)$$

3 – режим FC, когда компрессоры холодильной машины полностью отключаются. Температурная граница использования режима FC и, вообще, режима охлаждения помещений (если потребность в холоде не круглогодичная) – t_3 находится из условия

$$\Delta Q = 0. \quad (9)$$

Экономия достигается во 2-м и 3-м режимах, за счет снижения и прекращения затрат электроэнергии на выработку искусственного холода. Кроме того, в режиме FC сберегается ресурс компрессоров.

Временные границы каждого из этих интервалов (соответствующие некоторой j -й температуре) в безразмерном виде определяются формулой:

$$z_j = \text{ArcCos}((t_j - t_G) / A). \quad (10)$$

Во временном интервале $0 - z_1$ необходимая мощность холодильной машины чиллера определяется формулой (1) $\Delta Q_C = \Delta Q$, а мощность FC равна 0.

В интервале $z_1 - z_2$ мощность естественного охлаждения Q_{FC} будет возрастать, а мощность холодильной машины чиллера ΔQ_C – снижаться

$$\Delta Q_C = \Delta Q - Q_{FC}. \quad (11)$$



В интервале $z_2 - z_3$ мощность холодильной машины чиллера равна 0, вся необходимая мощность охлаждения достигается за счет FC и определяется по той же формуле (1) $\Delta Q_{FC} = \Delta Q$.

Необходимое количество холода (кВт·ч), вырабатываемого чиллером без FC за годовой цикл, определяется формулой:

$$Q_{Г-С} = (365/p) \cdot (x_2 - x_1) \cdot (s/7) / 3600 \cdot \int_0^{z_3} \Delta Q dz. \quad (12)$$

Необходимое количество холода (кВт·ч), вырабатываемого холодильной машиной при использовании FC за годовой цикл, определяется формулой:

$$Q_{Г-FC} = (365/p) \cdot (x_2 - x_1) \cdot (s/7) / 3600 \cdot \left(\int_0^{z_1} \Delta Q dz + \int_{z_1}^{z_2} \Delta Q_C dz \right), \quad (13)$$

где x_1 и x_2 – время начала и окончания работы чиллера в течение суток, ч; s – число рабочих суток в неделю, сут.

Эффективность выработки холода при использовании FC составляет:

$$h_x = (Q_{Г-С} - Q_{Г-FC}) / Q_{Г-С} \quad (14)$$

Затраты электроэнергии на работу чиллера складываются из затрат энергии компрессоров N_K , вентиляторов N_B , насосов N_H .

На выработку 1 кВт холода расходуется, в зависимости от типа компрессоров, хладагента и температурных условий, 0,32 ÷ 0,38 кВт электроэнергии ($K_1 = 0,32 \div 0,38$). Повышение температуры холодной воды на 1 °С, при прочих равных условиях, приводит к снижению потребления энергии компрессором на 1 ÷ 1,5 % ($K_2 = 0,01 \div 0,015$).

У чиллера с воздушным конденсатором с понижением температуры воздуха на 1 °С затрачиваемая мощность компрессоров уменьшается на 2 ÷ 2,5 % ($K_3 = 0,02 \div 0,025$). С учетом сказанного, изменение N_K можно описать приближенной зависимостью:

$$N_K = K_1 \cdot \Delta Q \cdot ((1 - K_2 \cdot (t_{w1} - t_{w10})) \cdot (1 - K_3 \cdot (t_{MAX} - t))). \quad (15)$$

Зависимость (15) применяется в данном расчете в зоне работы компрессоров без FC, при $t \geq t_1$. В зоне температур $t < t_1$ учитывается только зависимость

N_K от ΔQ , остальные параметры сохраняются такими же, как на границе этой зоны.

Мощность вентиляторов чиллера максимальна $N_{BMAX} = k_4 \cdot \Delta Q_{MAX}$ при $t = t_{MAX}$. В диапазоне температур от t_{MAX} до t_1 мощность вентиляторов снижается пропорционально уменьшению нагрузки. В диапазоне температур от t_1 до t_2 она максимальна, чтобы полностью использовать возможности FC. При дальнейшем снижении температуры до t_3 , величина N_B снижается

$$N_B = K_4 \cdot \Delta Q \cdot (t_{w2} - t_2) / (t_{w2} - t). \quad (16)$$

В зависимости от конкретной марки и типоразмера чиллера $K_4 \approx 0,04 \div 0,06$.

Мощность циркуляционного насоса при неизменном расходе жидкости постоянна, а при регулируемом расходе она пропорциональна 3-ей степени расхода

$$N_H = K_5 \cdot \Delta Q_{MAX} \cdot (G_w / G_{wMAX})^3. \quad (17)$$

Мощность насоса зависит от конструкции гидравлической системы, величина K_5 может варьироваться в широком диапазоне, ориентировочно $K_5 = 0,03 \div 0,15$.

Общая мощность устройств чиллера, потребляющих электроэнергию при использовании FC и при отсутствии FC, определяется формулой:

$$N = N_K + N_B + N_H, \quad (18)$$

с учетом высказанных выше особенностей включения и регулирования этих устройств.

Годовое потребление электроэнергии чиллера без FC составит:

$$E_{Г-С} = (365/p) \cdot (x_2 - x_1) \cdot (s/7) / 3600 \cdot \int_0^{z_3} N dz \quad (19)$$

Годовое потребление энергии чиллером с FC определяется формулой:

$$E_{Г-FC} = (365/p) \cdot (x_2 - x_1) \cdot (s/7) / 3600 \cdot$$

$$\left(\int_0^{z_1} N dz + \int_{z_1}^{z_2} N dz + \int_{z_2}^{z_3} N dz \right) \quad (20)$$

Эффективность энергопотребления при использовании FC составляет:

$$h_E = (E_{Г-С} - E_{Г-FC}) / E_{Г-С}, \quad (21)$$

тогда уменьшение затрат электроэнергии выражается формулой:



Таблица

| Тем- ры: $t_{W10}/$ $t_{W20},$ $^{\circ}\text{C}$ | Кли- мат. усл.: $t_{\Gamma}/$ $A, ^{\circ}\text{C}$ | $Q,$ $Q_{C\text{MAX}}$ кВт | $Q_{\Gamma-C},$ $Q_{\Gamma-FC}$ кВт·ч в год | h_X | $E_{\Gamma-C},$ $E_{\Gamma-FC}$ кВт·ч в год | h_E | Время, $Z_1-0,$ $Z_1-Z_2,$ $Z_3-Z_2,$ сут. | $\Delta E,$ тыс. кВт·ч в год | $\Delta \mathcal{E},$ тыс. руб/год $\Delta I,$ тыс. руб |
|---|---|----------------------------------|--|-------|--|-------|--|---------------------------------------|---|
| 10/15 | 10/25 | 15,0 20,3 | 60846 44231 | 0,27 | 27362 17901 | 0,35 | 147,1 18,3 199,7 | 9,5 | 14,9 168,9 |
| | | 20,0 25,3 | 92131 58950 | 0,36 | 37951 23800 | 0,37 | 150,7 23,0 191,3 | 14,2 | 29,7 252,5 |
| | 5/25 | 15,0 17,6 | 49857 34149 | 0,32 | 23454 14318 | 0,39 | 124,8 21,2 219,0 | 9,1 | 19,2 163,1 |
| | | 1) 20,0 22,6 | 81142 47104 | 0,42 | 34155 19791 | 0,43 | 128,5 26,3 210,2 | 14,9 | 31,2 265,3 |
| | 0/25 | 15,0 15,0 | 39551 25051 | 0,37 | 19545 10919 | 0,44 | 101,1 25,6 238,3 | 8,6 | 18,1 154,0 |
| | | 20,0 20,0 | 70837 36172 | 0,49 | 31399 15890 | 0,49 | 104,8 31,4 228,8 | 15,5 | 32,6 276,8 |
| 10/15 | 5/25 | 2) 20,0 22,6 | 81142 47104 | 0,42 | 43157 21372 | 0,51 | 128,5 26,3 210,2 | 20,8 | 45,7 388,7 |
| 7/12 | 5/25 | 3) 20,0 22,6 | 81142 48629 | 0,40 | 34262 20064 | 0,41 | 136,5 23,4 205,1 | 14,2 | 29,8 253,4 |

$$\Delta E = E_{\Gamma-C} - E_{\Gamma-FC} = E_C \cdot h_E, \quad (22)$$

а годовая экономия средств (руб/год), связанная с экономией электроэнергии, равна:

$$\Delta \mathcal{E} = C_E \cdot \Delta E, \quad (23)$$

где C_E – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

При норме дисконта $r=0,1$, инвестиции в энергосбережение являются перспективными с учетом наращивания получаемых доходов, если срок окупаемости $T_0 \leq 8,5$ лет [2]. Тогда, целесообразные инвестиции (удорожание чиллера с FC), оправданные годовой экономией денежных средств, определяются выражением:

$$\Delta I = T_0 \cdot \Delta \mathcal{E} \leq 8,5 \cdot \Delta \mathcal{E} \quad (24)$$

Результаты

Разработана компьютерная программа, реализующая расчет по указанным выше зависимостям. В таблице приведены результаты расчетов при следующих значениях исходных величин:

$V = 1000 \text{ м}^3$, $L = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ (1-кратный воздухообмен),

$t_B = 25^{\circ}\text{C}$, $q = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Характерные температуры:

$t_{II} = 10^{\circ}\text{C}$, $t_{FCO} = 5^{\circ}\text{C}$, $t_{WFCO} = 15,0^{\circ}\text{C}$; для FC-чиллеров

типично $Q_{FCO} \approx 0,65 \cdot Q_{C\text{MAX}}$. Коэффициенты:

$K_1 = 0,35$, $K_2 = 0,015$, $K_3 = 0,02$, $K_4 = 0,05$, $K_5 = 0,06$.

Режим работы – круглосуточный ($x_2 - x_1 = 24$ ч), число рабочих суток в неделю $s = 5$ сут. Стоимость электроэнергии – 2,1 руб/кВт·ч. Остальные исходные данные представлены в таблице.

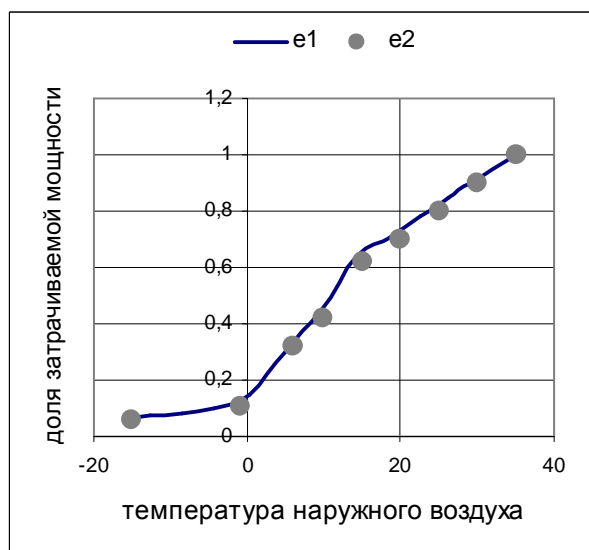


Рис.

Сравнение результатов расчета с данными чиллера KAPPA.V2001/FC [3] при неизменной нагрузке (тестовая кривая): e1 – результаты расчета; e2 – данные [3], совпадение хорошее.

Из расчетов следует, что для применения FC наиболее значимы поступления теплоты и климатические условия. Большим поступлениям теплоты соответствует большая эффективность FC, а более жаркому климату – меньшая эффективность.

Варианты длительности работы, зависящие от числа рабочих часов в сутках и количества рабочих суток в неделю, отдельно не представлены, так как ясно, что большей длительности соответствует больший экономический эффект.

Регулирование расхода холодной воды приводит к повышению эффективности FC за счет экономии энергии на работу и компрессоров, и насоса. Снижение потребления энергии насосом особенно заметно при его повышенной установочной мощности. Условия расчетов, помеченных 1) и 2), отличаются только тем, что во втором случае мощность насоса выше, $K_5 = 0,12$. Понижение температур жидкости

t_{W10} / t_{W20} несколько понижает эффективность FC. Это видно из сравнения расчетов, помеченных 1) и 3), отличающихся только величинами t_{W10} / t_{W20} .

Эффективность FC с регулированием расхода холодной воды достаточно высока, значительно выше, чем при поддержании постоянной температуры и расхода воды [4].

Заключение

Регулирование расхода воды значительно повышает эффективность чиллеров с FC, расширяет область применения. Полученные результаты дают общую оценку эффективности их использования. Предложенный способ оценки позволяет определять целесообразность применения такого чиллера в конкретных условиях.

Климатическая модель, модель нагрузки чиллера могут совершенствоваться. Уточнение коэффициентов

$K_1 \div K_5$ или более точное описание соответствующих зависимостей целесообразно для конкретного типоразмера чиллера, с определенным хладагентом и циркуляционным насосом.

Литература

1. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 70 с.
2. Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Оценка экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия // «АВОК», 2005, № 7. – С. 10-16.
3. «BLUE BOX» condizionamento // http://www.bluebox.ru/Kappa_V_2001_FC_s.pdf. (дата обращения 1.03.2009).
4. Бройда В.А. Оценка эффективности использования чиллеров с режимом свободного охлаждения // Материалы Междунар. научн. конф. «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». – Волгоград, 2007. – С. 121-126.