Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 62—65

УДК 624.139

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОНВЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Г. П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения СО РАН им. акад. П. И. Мельникова, 677018, г. Якутск, Россия

Рассмотрены особенности работы воздушных охлаждающих устройств конвективного действия — термосифонов известной и предлагаемой конструкций. Показаны факторы, определяющие льдообразование в коаксиальных термосифонах. Выявлены условия, при которых зарастание каналов термосифонов льдом не происходит или происходит через определенное время их работы. Получены расчетные зависимости между поперечными размерами каналов термосифонов, параметрами процессов льдообразования и сублимации льда и продолжительностью полной закупорки термосифонов льдом. Приводятся результаты экспериментальных исследований льдообразования и сублимации льда в термосифоне.

Воздушный термосифон, расчет, сублимация льда, льдообразование

IMPROVEMENT OF THE RELIABILITY OF AIR CONVECTION TYPE REFRIGERATION UNITS

G. P. Kuzmin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia

Peculiarities of the work of air convection type refrigeration units — thermosiphons of the known and proposed design have been discussed. Factors which predetermine ice formation in coaxial thermosiphons are shown. The conditions have been established under which ice sublimation in channels of thermosiphon does not occur, or occurs some time later during their operation. Calculated relationships have been obtained between the lateral sizes of thermosiphon channels, parameters of the ice formation and ice sublimation processes and the duration of complete plugging of thermosiphons with ice. The results of experimental studies of ice formation and ice sublimation in thermosiphon are given.

Air thermosiphon, ice formation, ice sublimation, calculation

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные устройства с естественной циркуляцией теплоносителя (термосифоны) используются для управления температурным режимом грунтов в фундаментостроении и гидротехнике. Воздушные термосифоны вследствие низкой надежности практически не нашли применения. В летнее время на холодных стенках каналов воздушного термосифона образуется лед, который может вызвать его закупорку.

С целью повышения надежности работы воздушных термосифонов выполнены теоретические и экспериментальные исследования льдообразования и сублимации льда.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Движение воздуха в термосифонах происходит за счет разности давлений столбов воздуха в двух сообщающихся каналах, возникающей в результате радиального притока или отвода тепла, и разности ветрового разрежения наружного воздуха у входа и выхода каналов, расположенных на разной высоте от поверхности земли. Циркуляционное движение воздуха в термосифоне обусловлено в холодное время года в основном первым фактором, а в теплое время года — вторым. Движение теплого воздуха в термосифонах приводит к конденсации влаги и намерзанию ее на стенках канала.

В известном коаксиальном термосифоне с возвышающейся внутренней трубой (рис. 1) в летнее время движение воздуха происходит вниз по кольцевому межтрубному пространству и вверх по внутренней трубе. При таком направлении движения воздуха наибольшее количество конденсационного льда образуется в узком кольцевом канале.

В открытых каналах термосифонов лед намерзает также в результате попадания в них дождевых капель.

В настоящее время нет методов оценки льдообразования в воздушных термосифонах.

© Г. П. Кузьмин, 1997

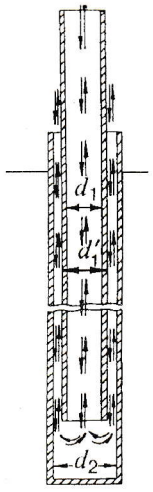

Рис. 1. Воздушные термосифоны известной конструкции.

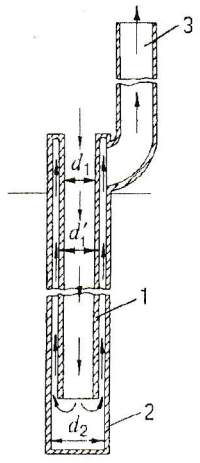

Рис. 2. Воздушные термосифоны новой конструкции.

На основании изложенного, повышение надежности работы воздушных термосифонов может быть достигнуто за счет: 1) обеспечения летнего движения нисходящего потока воздуха по каналу с большим поперечным размером, т. е. по внутренней трубе; 2) снижения общего количества льда, образующегося на стенках канала; 3) установления зависимости между размерами каналов термосифонов, сроком их работы и параметрами льдообразования и сублимации льда.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач рассмотрены особенности льдообразования и сублимации льда в воздушных коаксиальных термосифонах и проведены экспериментальные исследования этих процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработана новая конструкция воздушного термосифона (рис. 2), состоящего из внутренней (1), наружной (2) и вытяжной (3) труб. Верхние концы внутренней и наружной труб располагаются на одном уровне, а пространство между ними закрывается. Межтрубное пространство соединяется с вытяжной трубой через окно, вырезанное на стенке наружной трубы. В таком термосифоне воздух движется всегда в направлении внутренняя труба — межтрубное пространство — вытяжная труба. В летнее время движение происходит за счет различной скорости ветра у концов внутренней и вытяжной труб, расположенных на разной высоте. Лед образуется на стенках внутренней трубы, диаметр которой значительно превышает ширину кольцевой щели.

Условия, при которых каналы термосифона полностью не закупориваются льдом, можно записать в виде:

$$\text{при } \xi_л \le \xi_c, \quad L > 2\xi_л, \tag{1}$$

$$\text{при } \xi_л > \xi_c, \quad L \ge 2(\xi_л - \xi_c)(\tau - 1) + 2\xi_л, \tag{2}$$

где $\xi_л$ — толщина льда, намерзаемого в теплое время года; ξ_c — толщина льда, испаряющегося в холодное время года; L — поперечный размер канала, в котором образуется лед; τ — число лет полного зарастания канала льдом, начиная с летнего периода.

Поперечный размер канала, в котором образуется лед:

в термосифоне известной конструкции

$$L = \frac{d_1}{2}\frac{1-j}{ij}, \tag{3}$$

в термосифоне новой конструкции

$$L = d_1, \tag{4}$$

где d_1 — внутренний диаметр внутренней трубы; $i = d_1/d_1^1$ — относительный размер толщины стенки внутренней трубы; $j = d_1^1/d_2$ — относительный размер кольцевого канала; d_1^1 — внешний диаметр внутренней трубы; d_2 — внутренний диаметр наружной трубы.

Подставив (3) и (4) в (1) и (2), получим зависимости для определения минимально допускаемых размеров термосифонов:

известной конструкции

$$\text{при } \xi_л \le \xi_c, \quad d_1 > \frac{4\xi_л\, ij}{1-j}, \tag{5}$$

при $\xi_л > \xi_c$, $d_1 \geq 4[(\xi_л - \xi_c)(\tau - 1) + \xi_л] \frac{ij}{1 - j}$; (6)

новой конструкции

$$\text{при } \xi_л \leq \xi_c, \quad d_1 > 2\xi_л, \tag{7}$$

$$\text{при } \xi_л > \xi_c, \quad d_1 \geq 2[(\xi_л - \xi_c)(\tau - 1) + \xi_л]. \tag{8}$$

Отношение минимально допускаемых диаметров d_1 термосифонов известной и новой конструкции равно

$$k = \frac{2ij}{1 - j}. \tag{9}$$

При $i = 0{,}9$; $j = 0{,}76$; $k = 5{,}7$, т. е. для обеспечения самоочистки от льда поперечные размеры термосифона известной конструкции должны быть в 5,7 раза больше поперечных размеров термосифона новой конструкции.

Для определения величин $\xi_л$ и ξ_c в условиях Якутска были выполнены натурные эксперименты. Экспериментальные определения $\xi_л$ проводились в термосифоне с тремя разными устройствами, снижающими возможность закупорки его льдом: 1) схема 1 — термосифон новой конструкции, в котором возможность его закупорки льдом уменьшена путем обеспечения льдообразования в канале с большим поперечным размером; 2) схема 2 — то же, но с устройством для уменьшения летней циркуляции воздуха в виде четырех окон, прорезанных в верхней части внутренней трубы, через которые теплый воздух проходит из внутренней трубы в вытяжную; 3) схема 3 — то же, но с козырьком над внутренней трубой, предотвращающим попадание в нее дождевых капель.

Основные размеры термосифонов: $d_1 =$ = 96 мм; $d_2 = 159$ мм; $h = 16{,}0$ м.

В конце теплого периода года определяли количество намерзшего льда V, длину l и максимальную толщину $\xi_л$ ледяного покрытия:

Параметры ледяного покрытия	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Общий объем (V), л	12,0	3,0	1,0
Длина (l), м	12,0	3,0	0,3
Толщина ($\xi_л$), мм	20,0	40,0	10,0

Сравнивая между собой все три схемы, можно записать

$$V_1 : V_2 : V_3 = 12 : 3 : 1$$

$$l_1 : l_2 : l_3 = 40 : 10 : 1$$

$$\xi_л^1 : \xi_л^2 : \xi_л^3 = 2 : 4 : 1.$$

Устройство окон на стенке внутренней трубы термосифона (схема 2) уменьшило общее количество льда в 4 раза. Однако при этом максимальная толщина льда в 2 раза увеличилась. Это вызвано, по-видимому, снижением или отсутствием движения воздуха во внутренней трубе ниже окон. Наилучшие условия создаются при схеме 3. В экспериментах в 12 раз уменьшился объем льда и в 2 раза толщина льда.

Исследования сублимации льда в термосифонах были проведены в конце февраля — начале марта в течение 720 ч. Температура воздуха колебалась в пределах минус 20 … 30 °С. Образцы льда массой около 500 г помещались в начале нисходящего и в конце восходящего потоков термосифона. В процессе эксперимента периодически определяли изменения массы и размеров образцов. По этим данным рассчитывали интенсивность сублимации льда, средние значения которой составили в начале нисходящего потока $J_1 = 0{,}6 \cdot 10^{-2}$ мм/ч, в конце восходящего потока $J_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ мм/ч.

Суммарную величину испаряющегося слоя льда в нисходящем потоке приближенно можно определить по формуле

$$\xi_c = J_1 \tau_c, \tag{10}$$

где τ_c — продолжительность функционирования термосифона в холодное время года.

В Якутске $\tau_c = 4680$ ч и $\xi_c = 0{,}6 \cdot 10^{-2} 4680 =$ = 28,1 мм. При $\xi_л \leq \xi_c$, $i = 0{,}9$, $j = 0{,}76$ определим минимальные поперечные размеры термосифонов:

известной конструкции по формуле (5)

$$d_1 > \frac{4 \cdot 20 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}76}{1 - 0{,}76} = 228 \text{ мм};$$

новой конструкции по формуле (7)

с устройством по схеме 1 $\quad d_1 > 2 \cdot 20 = 40$ мм;

с устройством по схеме 3 $\quad d_1 > 2 \cdot 10 = 20$ мм.

Для термосифона новой конструкции с устройством по схеме 2, когда $\xi_л > \xi_c$, определим минимальный диаметр внутренней трубы при $\tau = 3$ года по формуле (8)

$$d_1 = 2[(40 - 28{,}1)(3 - 1) + 40] = 127{,}6 \text{ мм}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В термосифоне новой конструкции путем обеспечения циркуляции воздуха в определенном направлении достигнуто льдообразование в канале с большим поперечным размером. Кроме того, восходящий поток холодного воздуха по кольцевой щели обеспечивает более равномерное охлаждение грунта по высоте термосифона и более эффективный отвод тепла, чем нисходящий поток холодного воздуха по кольцевой щели в термосифоне известной конструкции. Дополнительные устройства по уменьшению летней циркуляции воздуха и исключению попа-

дания атмосферных осадков в термосифоне новой конструкции позволили снизить общее количество и толщину намерзаемого льда.

Полученные зависимости минимальных размеров каналов воздушных термосифонов от срока их службы и параметров льдообразования и сублимации льда в них являются основой для проектирования надежно работающих охлаждающих устройств.

Воздушные термосифоны новой конструкции впервые применены для создания мерзлотной завесы в Жатайской водохранилищной грунтовой плотине и замораживания воды в подземных резервуарах геокриогенных охлаждающих устройств.

Поступила в редакцию
12 июля 1997 г.