

С. А. Г а р а н о в, Л. Б. В о л о к и т и н,  
О. Б. Б и о н ы ш е в

## ПРИМЕНЕНИЕ В СКВ “КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО ЧИЛЛЕРА”

*Рассмотрены различные способы организации испарительного охлаждения воды. Приведены сравнительный анализ указанных способов, границы применимости предлагаемого способа.*

**E-mail: garanov-sergei@yandex.ru**

**Ключевые слова:** испарительное охлаждение, градирня, кондиционирование воздуха.

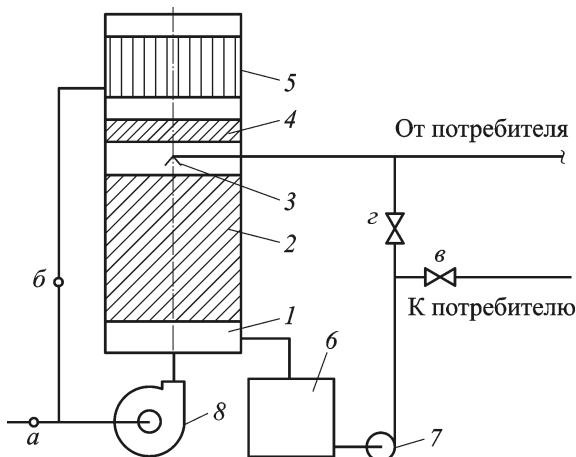
Для снижения расхода воды, используемой в качестве охлаждающей среды в технологических аппаратах (промежуточных и конечных теплообменниках компрессоров, конденсаторах холодильных машин и т.п.), обычно применяют оборотное водоснабжение. Для повторного использования нагретую воду охлаждают в вентиляторной градирне — контактном аппарате, где вода охлаждается за счет своего частичного испарения в потоке наружного воздуха. Конечная температура охлажденной воды зависит от конструктивных факторов градирни и параметров наружного воздуха.

Данный способ прямого испарительного охлаждения воды основан на термодинамической неравновесности атмосферного воздуха и психрометрической разности температур сухого и мокрого термометров, которая является возобновляемым энергоресурсом для получения холода.

Совершенствованию процессов тепломассообмена в градирнях в целях снижения температуры охлажденной воды посвящен ряд работ, но все усовершенствования конструкций градирни лишь приближают значение конечной температуры охлажденной воды к ее теоретическому пределу охлаждения, которым является температура влажного термометра наружного воздуха. Практически вода в градирнях охлаждается до температуры на 3...5 °С выше температуры мокрого термометра наружного воздуха.

Одним из решений, позволяющих дополнительно снизить температуру охлажденной в градирне воды, является предварительное охлаждение (при постоянном влагосодержании  $d_n$ ) наружного воздуха перед подачей его в градирню, т.е. переход к косвенно-испарительному охлаждению.

**Предложения по снижению температуры охлажденной воды в градирне.** В целях повышения охлаждающей мощности градирни и снижения теоретического предела охлаждения воды ниже температуры по мокрому термометру наружного воздуха было разработано



**Рис. 1. Принципиальная схема градирни на основе косвенно-испарительного охлаждения:**

1 – корпус; 2 – насадка; 3 – форсунка; 4 – каплеуловитель; 5 – пластинчатый теплообменник; 6 – бак для воды; 7 – насос; 8 – вентилятор; а, б – шиберы; з, з – вентили

устройство [1], в котором наружный воздух предварительно охлаждается в пластинчатом теплообменнике охлажденным и увлажненным воздухом, выходящим из градирни (рис. 1).

Проведенные расчеты показывают, что в среднем на каждые  $4^{\circ}\text{C}$  охлаждения наружного воздуха перед подачей его в градирню мы получим дополнительное снижение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  охлажденной воды, следовательно, при реализации данного предложения эффект дополнительного снижения температуры воды составит всего лишь  $1 \dots 1,5^{\circ}\text{C}$ .

Более заметное дополнительное охлаждение воды возможно получить лишь при более глубоком предварительном охлаждении наружного воздуха, для чего в работе [2] предложено предварительно охладить наружный воздух в теплообменнике регенеративного косвенного испарительного охлаждения (РКИО).

В этом противоточном теплообменнике используются два типа чередующихся каналов: сухие и влажные, где воздух по-разному изменяет свои параметры, при этом воздух во влажные каналы поступает после своего предварительного охлаждения в сухих каналах (рис. 2).



**Рис. 2. Способ регенеративного косвенного испарительного охлаждения воздуха**

Чередование каналов выполняется с использованием специально-го материала, например мипласта, у которого одна сторона имеет капиллярно-пористую поверхность, способную впитывать и сохранять в своей структуре воду, а другая — водонепроницаемую. Во влажных каналах температура воздуха снижается вследствие его контакта со смоченной водой капиллярно-пористой поверхностью. В сухих каналах воздух изолирован от контакта с водой и его температура и энтальпия снижаются вследствие охлаждения от стенки канала, которая имеет температуру, определяемую процессами в соседних влажных каналах. В сухих каналах воздух охлаждается при  $d_n = \text{const}$ , поэтому предельной температурой его охлаждения будет точка росы  $t_{\text{пред}} = t_{\text{тр}}$ .

Охлажденный в сухих каналах теплообменника РКИО воздух поступает в противоточную градирню, где вода охлаждается ввиду своего частичного испарения до температуры, близкой к температуре точки росы наружного воздуха.

Недостатком этого способа охлаждения воды можно считать лишь использование сразу двух теплообменников аппаратов (градирни и теплообменника РКИО).

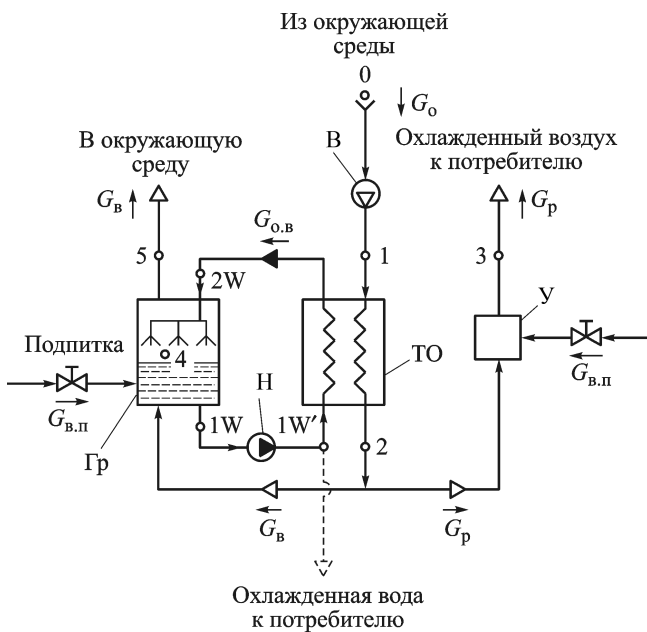
Ранее в работе [3] был предложен метод охлаждения воздуха и воды (в пределе до температуры росы наружного воздуха) с использованием градирни в качестве теплообменного аппарата и противоточного теплообменника (типа воздух–вода) для предварительного охлаждения наружного воздуха (рис. 3).

Часть охлажденного в теплообменнике воздуха ( $G'_в$ ) направляется в градирню, другую часть ( $G'_р$ ) предлагается использовать в качестве приточного воздуха СКВ. Часть охлажденной в градирне воды поступает в противоточный теплообменник для охлаждения воздуха, другая часть отводится к потребителю, где может быть использована в целях охлаждения воздуха и технологического оборудования.

Рассматриваемые процессы, происходящие в схеме, для наглядности приведены в  $i-d$  диаграмме на рис. 4.

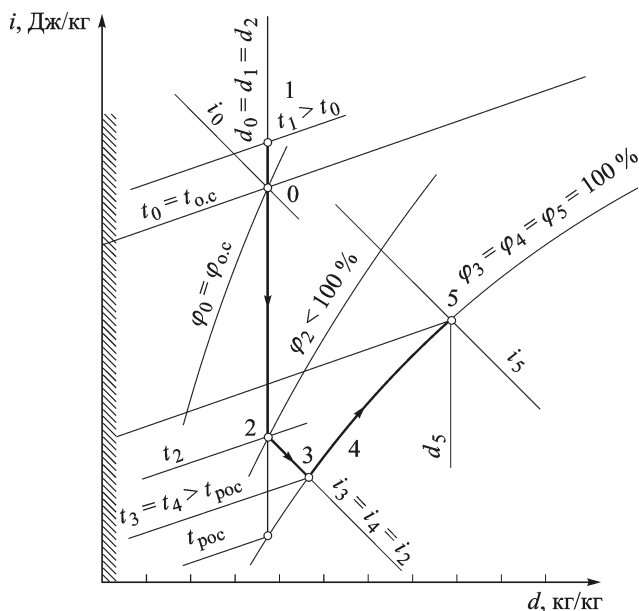
Практически по этой же схеме, причем с полезным использованием для потребителя только охлажденной воды, авторами работы [4] был реализован косвенно-испарительный водоохладитель-чиллер, который применен в качестве источника холодной воды (чиллера) в СКВ ряда общественных зданий в городах Китая (рис. 5).

Косвенно-испарительный чиллер состоит из двух водо-воздушных противоточных теплообменников 1, противоточной градирни 2, водяного насоса 3, вытяжного вентилятора 4. Наружный воздух поступает в точку  $O$ , и сначала поступает в теплообменники воздух–вода для предварительного охлаждения до точки  $A$ , причем количество охлаждающей воды в теплообменнике определяется из условия равенства

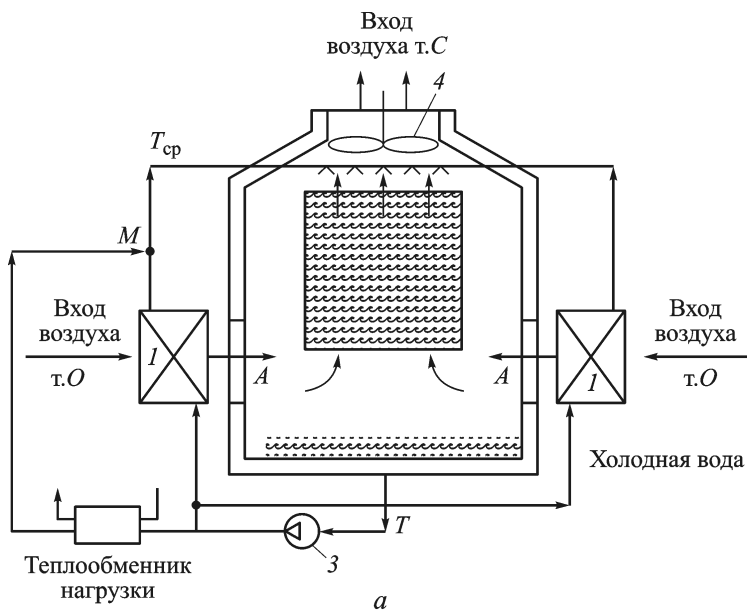


**Рис. 3. Принципиальная схема работы регенеративной косвенно-испарительной системы охлаждения воздуха и воды с градирней:**

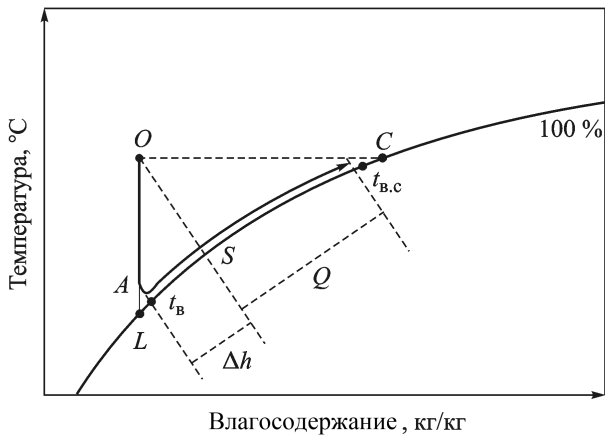
В — вентилятор; Гр — градирня; ТО — теплообменник; ОС — окружающая среда;  $G_o$ ,  $G_{o,v}$  — основные массовые расходы охлаждаемого воздуха и охлаждающей воды;  $G_p$  — рабочий массовый расход воздуха (направляемый к потребителю);  $G_v$  — массовый расход воздуха вспомогательного потока; Н — насос; У — увлажнитель воздуха



**Рис. 4. Диаграмма  $i-d$  процессов, происходящих в системе с основным, вспомогательным потоками воздуха и потоком, направляемым потребителю**



а



б

Рис. 5. Принцип работы водоохладителя (чиллера) СКВ (а), структура косвенного испарительного охладителя (б), процесс производства холодной воды в *i-d* диаграмме

водяных эквивалентов потоков воздуха и воды. Затем охлажденный воздух поступает в градирню и используется для испарительного охлаждения воды, меньшая часть которой затем направляется на охлаждение воздуха в противоточных теплообменниках 1, а большая часть охлажденной воды поступает в СКВ здания (рис. 6).

По результатам испытаний опытно-промышленной установки, работающей по принципу косвенно-испарительного чиллера [4], часть которых представлена на рис. 7 и 8, сделаны следующие выводы:

— температура охлажденной в косвенно-испарительном чиллере воды находится между температурами точки росы  $t_{т.р}$  и влажного тер-

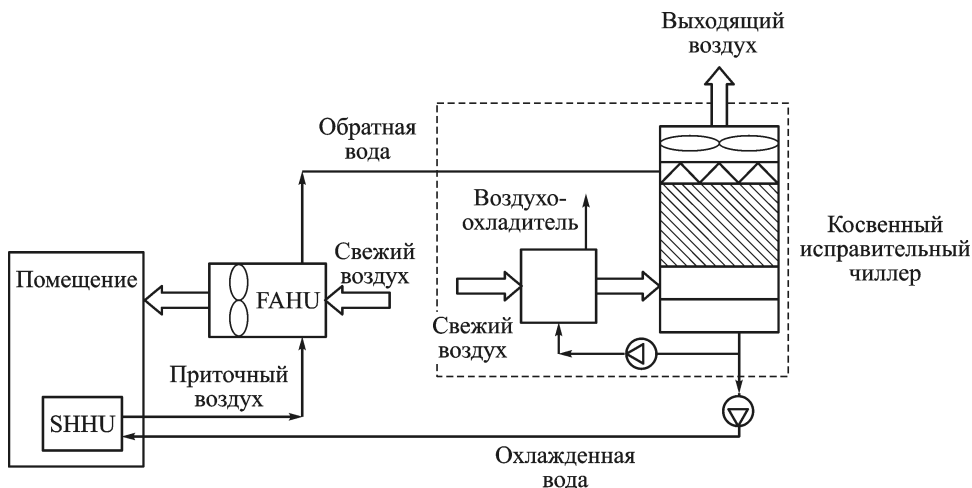


Рис. 6. Схема СКВ с использованием косвенно-испарительного чиллера

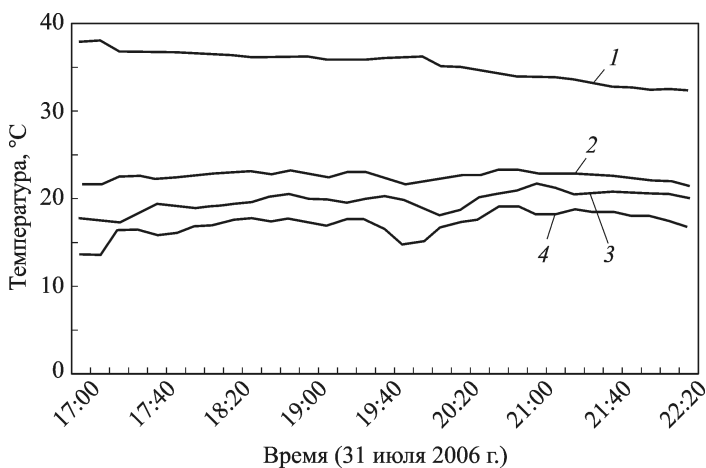


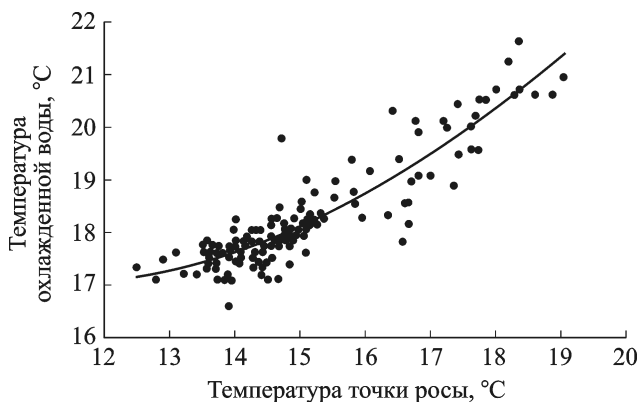
Рис. 7. Результаты испытаний косвенно-испарительного чиллера:

1, 2 — температура воздуха по сухому ( $t_{\text{сух}}$ ) и влажному ( $t_{\text{вл}}$ ) термометрам; 3 — температура охлажденной воды ( $t_{\text{воды}}$ ); 4 — температура точки росы воздуха ( $t_{\text{т.р.}}$ )

мометра  $t_{\text{вл}}$  наружного воздуха, причем ее значение можно оценить как среднее значение этих характерных температур (см. рис. 7);

— температура охлажденной в косвенно-испарительном чиллере воды на 2...4 °C выше температуры точки росы наружного воздуха (см. рис. 8).

При температуре точки росы наружного воздуха около 15 °C вода охлаждается до температуры 18 °C, а так как электроэнергию потребляют только вытяжной вентилятор и циркуляционный насос, то холодильный коэффициент косвенно-испарительного чиллера в этом режиме составлял 8–10. При снижении температуры точки росы наружного воздуха до 10 °C соответственно снижается и температура



**Рис. 8. Зависимость температуры воды на выходе косвенно-испарительного чиллера от температуры точки росы наружного воздуха**

охлажденной воды, а холодильный коэффициент чиллера повышается до 18.

Авторы работы [4] отмечают, что поскольку это первое практическое использование косвенно-испарительного чиллера, то конструкция его не была оптимизирована. Среди недостатков конструкции и оборудования отмечаются: недостаточная теплообменная поверхность теплообменников воздух–вода, недостаточная производительность вытяжного вентилятора.

Эти недостатки были учтены при разработке конструкции нового косвенно-испарительного чиллера. К 2010 г. косвенно-испарительные чиллеры и СКВ с их использованием были приняты в более чем 15 проектах, для обслуживания помещений общественных зданий общей площадью около 120 000 м<sup>2</sup> в Синьцзяне (Китай). Холодопроизводительность установленных чиллеров составляет от 120 до 700 кВт. В этих зданиях косвенно-испарительные чиллеры были использованы в качестве источника охлаждения системы кондиционирования воздуха, производя холодную воду с температурой 16... 19 °С. Результаты испытаний показывают, что температуры воздуха в кондиционируемых помещениях составляют 24... 27 °С, а относительная влажность 50... 65 %, что соответствует комфортным условиям [4].

Следовательно, в регионах с жарким и сухим климатом энергосберегающий косвенно-испарительный чиллер может быть успешно использован как источник холодной воды для СКВ, заменяя традиционные парокомпрессионные чиллеры.

В работах, посвященных разработкам и исследованиям процессов и тепломассообменных аппаратов РКИО, неоднократно отмечалось, что применение таких аппаратов в целях кондиционирования воздуха эффективно при значениях массового содержания водяного пара в воздухе  $d_n < 13$  г/кг, что соответствует температуре точки росы наружного воздуха  $t_{т.р} < 18$  °С.

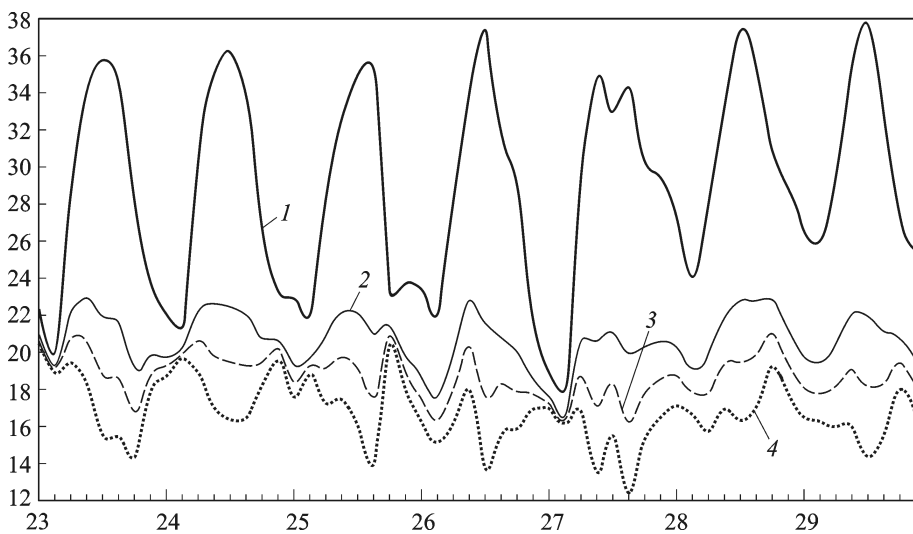
Для Москвы расчетные климатические условия при проектировании СКВ первого класса (параметры “Б” по СНиП 2-04-05-91\*):  
 $p_{o,c} = 99$  кПа;  $t_{o,c} = 28,5$  °С;  $h_{o,c} = 54$  кДж/кг.

Этим условиям соответствуют следующие параметры:  $\varphi_{o,c} = 40$  %;  
 $d_{o,c} = 9,9$  г/кг;  $t_{т.р} = 13,6$  °С;  $t_{вл} = 18,7$  °С.

При таких расчетных параметрах наружного воздуха косвенно-испарительный чиллер может охладить воду до температуры  $16,2$  °С, что позволит использовать данное техническое решение при кондиционировании общественных и производственных зданий в Москве и московском регионе.

Необходимо также рассмотреть возможность использования косвенно-испарительного чиллера в СКВ при предельных значениях климатических параметров. Такими, например, для московского региона являлись экстремально высокие значения в конце июля 2010 г. На рис. 9 представлены значения температур воздуха (по сухому термометру) и температуры росы воздуха, зафиксированные метеостанцией “Москва–ВВЦ” с 23 по 29 июля 2010 г. Там же приведены расчетные значения температуры воздуха по влажному термометру и температуры охлажденной воды (при использовании косвенно-испарительного чиллера).

Приведенные данные показывают, что даже для московского региона, считающегося умеренным по влажности, данный метод при экстремальных климатических параметрах июля 2010 г. позволяет охлаждать воду до температуры  $19 \pm 2$  °С, что дает возможность СКВ обеспечивать допустимые параметры микроклимата в общественных зданиях и производственных помещениях.



**Рис. 9. Значения характерных температур наружного воздуха и достижимой температуры охлаждения воды (г. Москва, июль 2010 г.):**

1 —  $t_{\text{сух}}$ ; 2 —  $t_{\text{вл}}$ ; 3 —  $t_{\text{воды}}$ ; 4 —  $t_{\text{т.р}}$



Предложенный метод охлаждения воды для СКВ может дать еще больший эффект для регионов с сухим жарким климатом.

Для широкого применения предложенного энергосберегающего метода кондиционирования необходимы современные эффективные решения, позволяющие использовать холодную воду с температурой 18...20 °С для комфортного кондиционирования помещений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А в е р к и н А. Г., Е р е м к и н А. И., М и р о н о в К. В. Градирня на основе косвенно-испарительного охлаждения воздуха // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. – 2008. – № 4 (37). – С. 68–70.
2. А р с и р и й В. А., Т а м е р Н. А. Б а н н у р а. Охлаждение воды в градирне до точки росы атмосферного воздуха // Труды Одесского политех. ун-та. – 2009. – Вып. 2 (32). – С. 73–77.
3. Ф р о л о в Ю. Д., Г а р а н о в С. А., Б и о н ы ш е в О. Б., Ж а р о в А. А. Тепловой расчет регенеративного косвенно-испарительного цикла охлаждения воздуха // Вестник Междунар. акад. холода (М.). 2001. – Вып. 3. – С. 29–32.
4. X i a o y u n X i e, Y i J i a n g. An indirect evaporative chiller // Front. Energy Power Eng. China 2010, 4(1): P. 66–76.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012