

УКД 536.7

**А.А.Халатов**, академик НАН Украины (Ин-т технической теплофизики НАН Украины, Киев),  
**И.Н.Карп**, академик НАН Украины, Почетный директор Института Газа НАН Украины, Киев,  
**Б.В.Исаков** (Генеральный конструктор ГП НПКГ "Зоря – Машпроект", Николаев)

## Термодинамический цикл Майсоценко и перспективы его применения в Украине

*В статье представлен обзор работ в области нового термодинамического цикла Майсоценко и его использования в различных отраслях промышленности Украины. Среди них энергетические газовые турбины, кондиционеры и охладители воздуха, опреснители морской воды, горелки с высоким содержанием влаги в воздухе и некоторые другие. Показано, что устройства на основе цикла Майсоценко обладают высокими технико-экономическими показателями, которые превышают характеристики современных установок.*

*У статті наведено огляд робіт в області нового термодинамічного циклу Майсоценко та його використання у різних галузях промисловості України. Серед них енергетичні газові турбіни, кондиціонери та охолоджувачі повітря, опріснювачі морської води, пальники з високим вмістом вологи в повітрі та деякі інші. Показано, що пристрої на основі циклу Майсоценко мають високі техніко-економічні показники, які перевищують характеристики сучасних установок.*

**Введение.** Быстрый рост стоимости углеводородов и прогрессирующее загрязнение окружающей среды заставляют человечество искать альтернативные источники энергии. Одним из потенциальных и неисчерпаемых источников энергии, который имеется практически в любой точке мира, является природная неравновесность атмосферного воздуха в форме разности температур сухого и мокрого термометра (психрометрическая разность температур, или разность температур атмосферного воздуха и воздуха, контактирующего с испаряющейся водой). В жарких и сухих регионах Земли эта разность может достигать 20-25°C. Так как разность любых потенциалов является источником энергии, то психрометрическая разность температур также может служить энергетическим ресурсом. До исследований американского ученого, бывшего гражданина Украины проф. Валерия Майсоценко, эта разность, ввиду ее малости, практически не использовалась. Майсоценко первым показал, как может быть увеличена и эффективно использована в различных приложениях психрометрическая разность температур. В статье рассматриваются возможные приложения в Украине цикла Майсоценко в энергетических, тепло- и массообменных технологиях.

**1. Цикл Майсоценко.** Высокая психрометрическая разность температур может быть получена в тепло- и массообменном аппарате косвенно-испарительного охлаждения при противоточном течении воздуха (газа) в системе сухих и влажных каналов. В таком аппарате создаются разделенные потоки воздуха, один из которых искусственно увлажняется, а другой – охлаждается. Процессы тепло- и массообмена, протекающие в аппарате, очень близки к обратимым термодинамическим процессам, поэтому в нем достигается максимальный эффект охлаждения воздуха с минимальными затратами энергии. Так как степень термодинамического совершенства рассматриваемой системы близка к единице, то теоретическим пределом охлаждения воздуха в противоточном аппарате косвенно-испарительного охлаждения является температура точки росы. Отметим, что в традиционном аппарате испарительного охлаждения (direct cooling) предельной температурой охлаждения является температура мокрого термометра охлаждаемого воздуха. Использование последовательности аппаратов испарительного охлаждения также позволяет приблизиться к температуре точки росы, но в этом случае стоимость оборудования резко возрастает.

Основываясь на теоретических положениях термодинамики влажных потоков, проф. В. Майсоценко (США) предложил и запатентовал в различных странах новый термодинамический цикл, известный как цикл Майсоценко (Maisotsenko Cycle), или М-цикл (M-Cycle). Этот цикл открыл путь создания высокой психрометрической разности температур [12] в одном аппарате, что позволило создать эффективные устройства теплообмена, возобновляемой и традиционной энергетики с высокими технико-экономическими показателями [3–8], часть из которых выпускается серийно.

Схема элементарной ячейки противоточного теплообменного аппарата с двумя независимыми потоками воздуха показана на рис. 1а [5–8]. Внешний поток, попадая в сухой рабочий канал, охлаждается за счет контакта с обратной стороной влажного рабочего канала, где происходит испарение воды. При идеальных условиях на входе во влажный рабочий канал воздух достигает насыщенного состояния, а его температура – температуры точки росы (т. 3, рис. 1а). При испарении во влажном рабочем канале температура воздуха, контактирующего с влажной стенкой, постепенно снижается, т.к. на испарение воды затрачивается его энергия, соответствующая скрытой теплоте испарения. При движении во влажном канале воздух сохраняет насыщенное состояние, но его абсолютная влажность возрастает, а температура (энтальпия) увеличивается.

Таким образом, в устройствах М-цикла реализуется разность энтальпий воздуха при температуре точки росы и того же, но насыщенного воздуха при более высокой температуре. Эта разность энтальпий используется для эффективного охлаждения потока воздуха в сухом канале охлаждения – теоретически до точки росы входящего воздуха.

Идеальный цикл Майсоценко представлен на рис. 2 линией 1-3-4-1 [1–3, 5, 8]. Здесь 1-3: охлаждение воздуха в сухом рабочем канале; 3-4: нагрев и увлажнение воздуха во влажном рабочем канале; 4-1: возврат воздуха в исходное состояние. При начальной температуре воздуха 160°F (71,1°C) абсолютная влажность воздуха в

М-цикле возрастает с 0,025 до 0,53 кг/кг, т.е. увеличивается более чем в 20 раз. Рост теплосодержания влажного воздуха определяется разностью энтальпий в точках 3 и 4, а уменьшение температуры воздуха в сухом канале охлаждения – разностью температур в точках 6 и 5. Достижимая в идеальном М-цикле влажность потока более чем в 6,5 раз больше, чем при традиционной схеме испарительного охлаждения (0,025–0,08 кг/кг, рис. 2), где влажность увеличивается только в 3,2 раза. Увеличение энтальпии влажного потока в М-цикле (линии постоянной энтальпии на рис. 2 не показаны) более чем в 4 раза открывает большие возможности в различных практических приложениях.

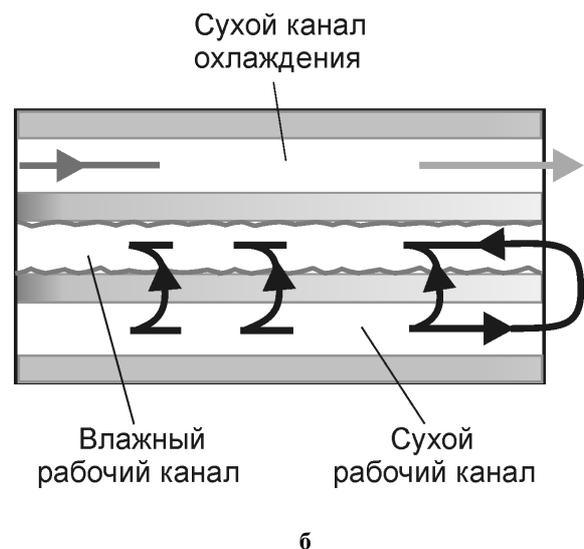
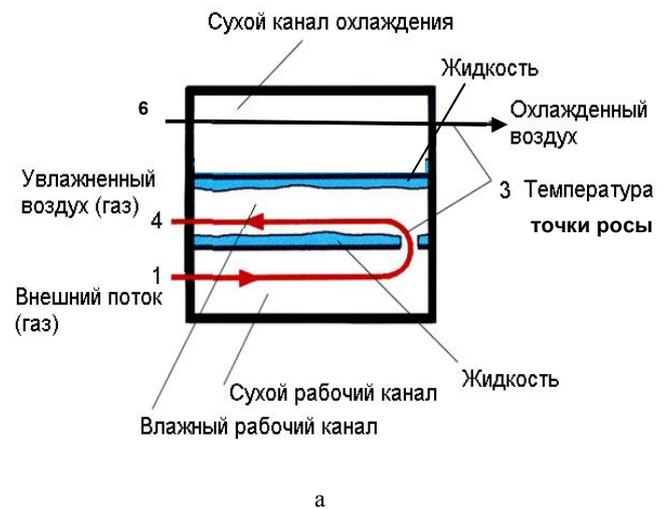


Рис. 1. Элементарная ячейка противоточного теплообменного аппарата косвенно-испарительного охлаждения [1, 2]: а – идеальная схема (точки 1, 3, 4, б показаны на рис. 2); б – схема с перфорированной стенкой.

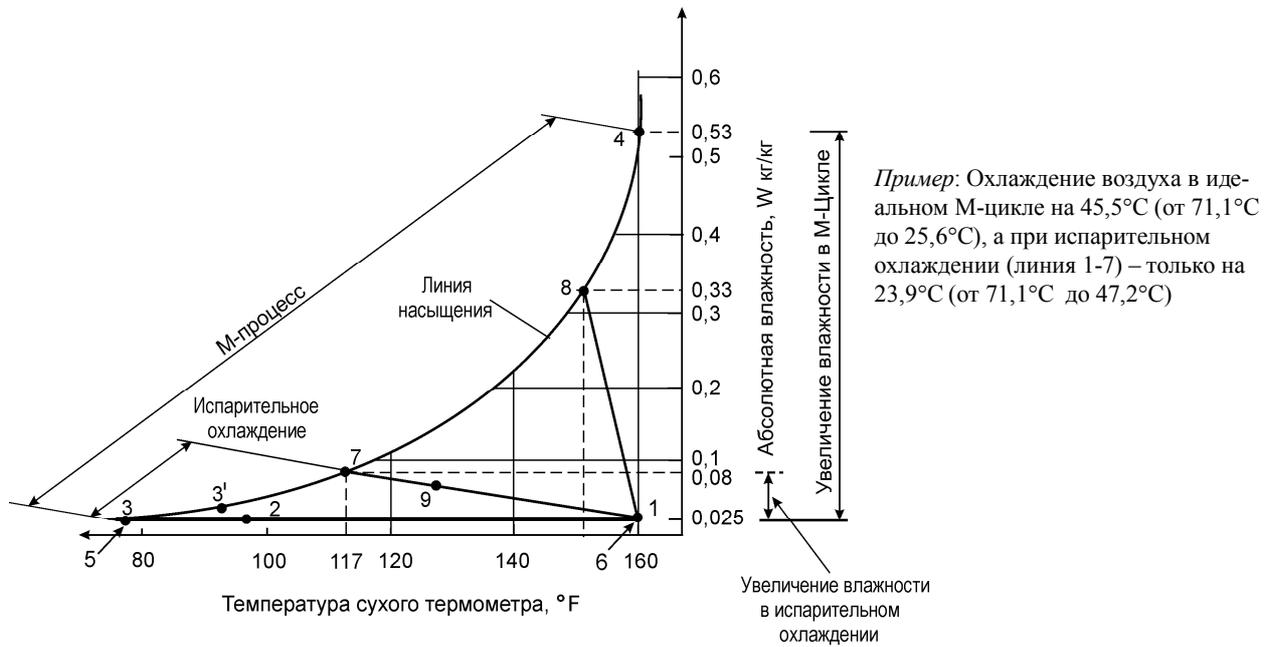


Рис. 2. М-цикл на психрометрической диаграмме [1, 2].

Из рис. 2 следует, что теоретическое охлаждение воздуха в М-цикле может составлять  $45,5^{\circ}\text{C}$  (от  $71,1^{\circ}\text{C}$  до  $25,6^{\circ}\text{C}$ ), а при испарительном охлаждении (линия 1-7) – только  $23,9^{\circ}\text{C}$  (от  $71,1^{\circ}\text{C}$  до  $47,2^{\circ}\text{C}$ ). Чем выше температура входящего воздуха, тем больший эффект охлаждения воздуха достигается в сухом канале охлаждения. В этом проявляется одно из наиболее важных свойств М-цикла – увеличение его эффективности с ростом температуры воздуха на входе (как известно, эффективность холодильного цикла с ростом температуры окружающей среды, наоборот, уменьшается). При высокой влажности входящего воздуха (газа) эффективность М-цикла может быть улучшена за счет его осушения на входе.

В реальных условиях охлаждение воздуха в сухом рабочем канале характеризует линия 1-2, а линия 2-3-8 – нагрев и увлажнение воздуха во влажном рабочем канале. Реальное испарительное охлаждение характеризуется линией 6-9 на рис. 2.

Идеальный противоточный теплообменный аппарат косвенно-испарительного охлаждения представляет собой систему элементарных ячеек по типу представленных на рис. 1. Его лабораторные испытания показали, что температуры воздуха на выходе из сухого рабочего канала и сухого канала охлаждения близки к температуре

точки росы, а на выходе из влажного канала – к температуре мокрого термометра (100% влажность).

Цикл Майсоценко используется не только в системах кондиционирования (охлаждения) воздуха. Большая разность плотности охлаждаемого и нагреваемого воздуха может быть использована в качестве движущей силы (разности потенциалов) в энергетических, тепло- и массообменных технологиях. Во всех случаях через сухой рабочий и влажный рабочий каналы проходит атмосферный воздух (или используемый газ). В системах кондиционирования через сухой канал охлаждения проходит воздух из атмосферы, а в энергетических, тепло- и массообменных технологиях – выхлопной газ энергетических установок или охлаждаемая рабочая жидкость (например, конденсаторы). Поскольку в устройствах на основе М-цикла используется потенциальная энергия окружающей среды (влажного воздуха атмосферы), то стоимость производимой энергии существенно меньше по сравнению с другими технологиями возобновляемой энергетики и стоимостью энергии, получаемой при сжигании природных углеводородов.

Исследования М-цикла показали, что при одинаковых параметрах внешнего воздуха сте-

пень термодинамического совершенства противоточной схемы косвенно-испарительного охлаждения (коэффициент неидеальности) в среднем в 2,5 раза выше, чем у испарительных систем охлаждения. Энергетическая эффективность установки на основе М-цикла (отношение холодопроизводительности к затратам энергии на транспортировку воздуха) существенно выше холодильного коэффициента традиционных установок.

Основные преимущества установок на основе М-цикла – экологическая безопасность, высокая экономичность, низкая удельная стоимость (конструкция не содержит сложных узлов), небольшие эксплуатационные затраты, конструктивная простота. Поскольку все процессы происходят при атмосферных условиях, то не возникает проблемы герметизации установки. Наиболее важным преимуществом является отсутствие дорогостоящего компрессора и холодильного агента.

Цикл Майсоценко может быть эффективно использован во многих климатических зонах мира, исключая зону тропиков и субтропиков. Некоторые данные, характеризующие климатические условия в городах Европы, в летнее время приво-

дятся ниже [13]: Копенгаген (Дания): температура мокрого термометра (ТМТ) – 17,3°C, температура точки росы (ТТР) – 13,5°C; Лондон (Великобритания): ТМТ – 20°C, ТТР – 14,6°C; Катания (Италия): ТМТ – 21,6°C, ТТР – 16,2°C; Измир (Турция): ТМТ – 20,4°C, ТТР – 12,5°C; Киев (Украина): ТМТ – 16,1°C, ТТР – 9,2°C (август 2012 г.). Несмотря на небольшую разницу между этими температурами, она представляет большой потенциал для практического использования.

**2. Перспективы использования М-цикла в Украине.** Перспективы практического использования М-цикла охватывают многие энергетические и теплообменные технологии (рис. 3). В настоящее время на международном рынке представлены испарительные, солнечные и гибридные кондиционеры, солнечные генераторы электроэнергии с охлаждающей системой по М-циклу. В стадии исследования и пилотного проектирования – промышленные градирни, увлажнители воздуха, установки для получения пресной воды из промышленных жидкостей и морской воды, охладители воздуха на входе в газовую турбину.

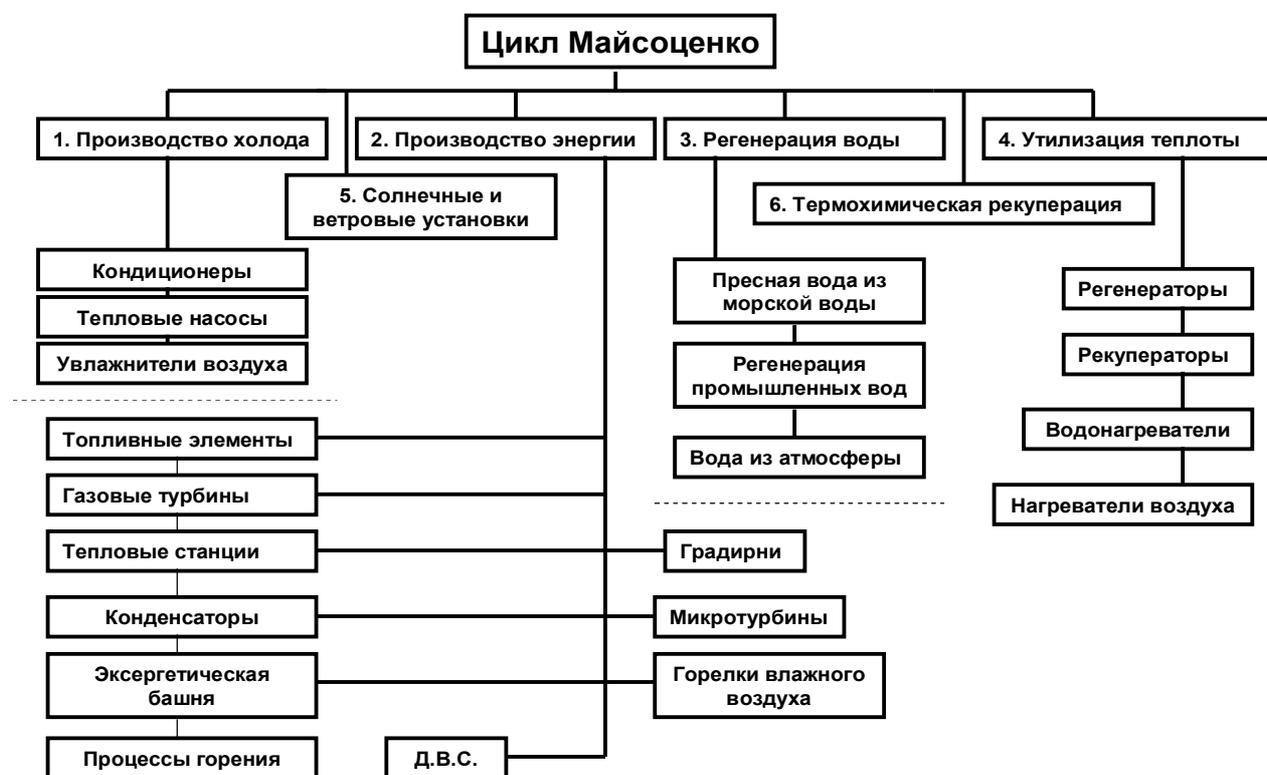


Рис. 3. Области использования цикла Майсоценко [5–8].



Рис. 4. Кондиционеры по циклу Майсоценко, выпускаемые серийно [5, 6].

Впервые на практике цикл Майсоценко был использован компанией *Coolerado Corporation* (Денвер, штат Колорадо; США) при создании кондиционеров нового поколения, которые выпускаются серийно в США, Европе, Индии, Китае, Австралии, Южной Америке, Сингапуре (рис. 4). Акт Национальной Лаборатории источников возобновляемой энергии США (NREL) подтверждает [9], что кондиционеры на основе М-цикла проще с конструктивной точки зрения, они потребляют почти в 10 раз меньше электрической энергии, чем традиционные кондиционеры компрессионного цикла. Такие кондиционеры на 100% используют чистый воздух окружающей среды, в то время как традиционные кондиционеры на 85% работают на рециркулируемом (уже использованном) в помещении воздухе. Исследование, выполненное в работе [2], показало, что максимальная (19,14%) эксергетическая эффективность цикла Майсоценко соответствует температуре окружающей среды 23,88°C.

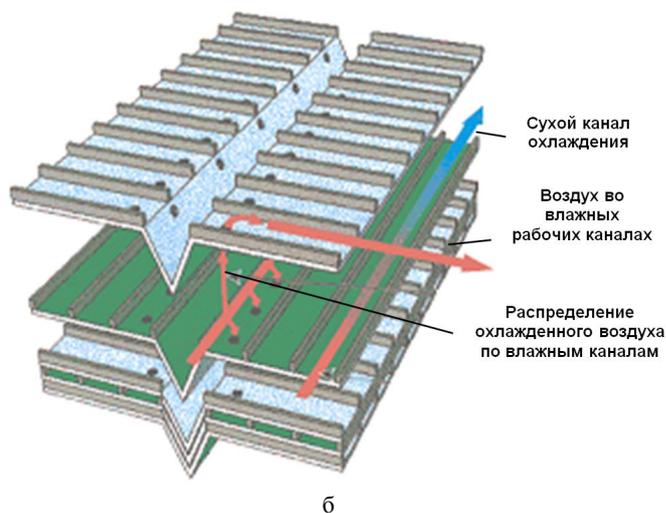


Рис. 5. Схема работы кондиционера Майсоценко (а) и теплообменного аппарата Майсоценко (б) [5, 6]:

1 – наружный воздух на входе в кондиционер; 2 – фильтр; 3 – теплообменный аппарат Майсоценко; 4 – рабочий влажный воздух; 5 – охлажденный воздух.

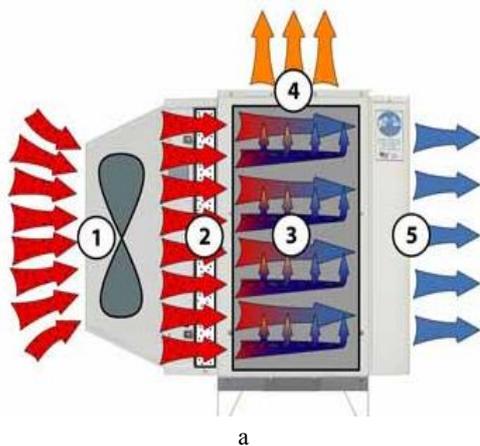
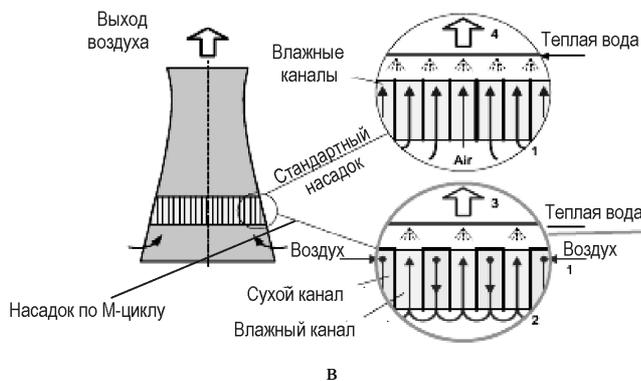
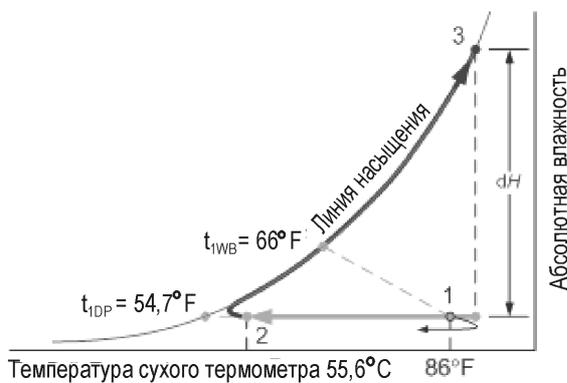
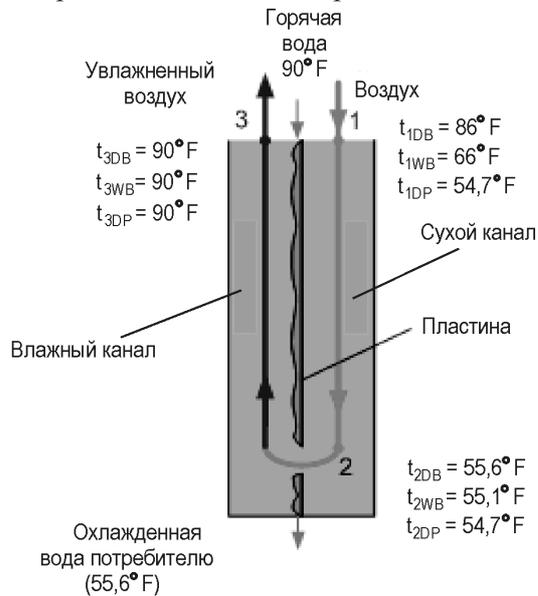


Схема работы кондиционера Майсоценко представлена на рис. 5а, а конструкция теплообменного аппарата – на рис. 5б. Эта конструкция представляет собой соединенные между собой пластины с чередованием влажных и сухих каналов. Поступающий в кондиционер атмосферный воздух разделяется на две части. Одна его часть постепенно подается во влажные рабочие каналы, а другая – в сухие каналы охлаждения. В отличие от идеальной конструкции, в этом случае применяется схема каналов с перфорированной стенкой, когда охлажденный воздух из сухих рабочих каналов поступает во влажные рабочие каналы через систему отверстий (рис. 1б). Вода подается в верхнее углубление пластины (рис. 5б),

стекает вниз, благодаря капиллярным силам (аппарат располагается немного наклонно) и далее растекается по влажным каналам. Поверхность влажного канала покрыта пористым материалом типа целлюлозы с высокой теплопроводностью в поперечном направлении, который функционирует как капиллярный фитиль. Это обеспечивает равномерное смачивание поверхности.



**Рис. 6.** Цикл Майсоенко в градирне открытого типа: схема течения (а); психрометрическая диаграмма (б); насадки по традиционному и М-циклу (в) [8].

Большое распространение в Украине могут получить солнечные кондиционеры, использующие теплообменник аппарата косвенно-испарительного охлаждения с вентилятором атмосферного воздуха, работающим от системы солнечных батарей малой мощности. Серийный солнечный кондиционер Coolerado Cooler R600 (рис. 4) использует только 4 солнечные батареи электрической мощностью по 200 Вт, которые питают вентилятор кондиционера М-цикла, но при этом охлаждает помещение площадью 225 м<sup>2</sup>. Традиционный компрессионный кондиционер требует для этого 20-30 батарей, или 4-6 кВт мощности. Большой интерес для Украины представляют гибридные кондиционеры, сочетающие кондиционер по М-циклу с традиционным компрессионным кондиционером на выходе (Hybrid H80, рис. 4). Это позволяет получить более низкую температуру охлаждаемого воздуха и на 80% снизить энергопотребление компрессионного кондиционера. Охлаждение солнечных батарей устройствами на основе М-цикла используется в солнечных кондиционерах компании *Coolerado Corporation* (США), в результате чего эффективность установки возрастает с 12-15% до 30-32%.

В ближайшей перспективе М-цикл может найти применение в двигателях внутреннего сгорания, газовых турбинах, топливных горелках, конденсаторах различного назначения, системах кондиционирования автомобилей, котлах и нагревателях воды, промышленных печах, системах термохимической рекуперации топлива.

Например, постановка керамического рекуператора косвенно-испарительного охлаждения на выходе из автомобильного двигателя, где температура составляет от 540 до 980°C, позволит утилизировать не только выхлопную теплоту и пары воды, содержащиеся в продуктах сгорания, но и теплоту системы охлаждения двигателя, что в пределе позволит отказаться от использования радиатора. Снижение "нижней" температуры термодинамического цикла до температуры точки росы существенно (до 55-60%) повышает КПД теплового двигателя, который сегодня составляет около 30%. Официальное тестирование, выполненное Центром Дэвиса Калифорнийского университета (США), показало, что сжигание жидкого топлива в воздухе

высокой влажности (30–40%) позволяет на 80% снизить его расход и на порядок уменьшить вредные выбросы в окружающую среду.

Часто во многих энергетических и технологических процессах основным лимитирующим фактором является температура холодной воды, для охлаждения которой используются градирни. Чем холоднее вода, тем интенсивнее отвод теплоты в конденсаторе, который является составной частью многих технических устройств. Недостаточно низкий вакуум в конденсаторе электростанции, вследствие недостаточного охлаждения воды в градирне, приводит к снижению КПД электростанции и повышенному расходу топлива на выработку единицы энергии. Исследования, выполненные *Electric Power Research Institute* (США), показали, что 65% градирен в энергетике США работают в условиях, не соответствующих оптимальным по эксплуатационным характеристикам и климатическим условиям, что стоит американской электроэнергетике более 100 млн долл. США в год за счет потери мощности или снижения производства электроэнергии [14].

В настоящее время в мире насчитывается более миллиона градирен контактного типа, только в США их установлено несколько сотен тысяч. Теоретически при температуре окружающей среды 30°C и относительной влажности воздуха 35% температура воды в такой градирне может быть снижена на 10°C (от 32°C до 22°C). Однако реальная эффективность градирен не превышает 65–70%. Так как температура охлаждения воды ограничивается температурой мокрого термометра воздуха окружающей среды, то такие градирни наиболее эффективны в районах с очень низкой влажностью воздуха. Тем не менее, градирни подобной конструкции широко используются в Украине, где влажность является умеренной (30–50%). Как результат, их работа протекает в условиях, далеких от оптимальных. Использование насадок пленочного типа увеличивает поверхность контакта воздуха и охлаждаемой воды. Однако в этом случае удается только повысить компактность аппарата, но не "нижнюю" температуру охлаждения, которая остается выше температуры мокрого термометра окружающей среды.

При температуре окружающего воздуха 30°C и его относительной влажности 35% температура воды в градирне контактного типа тепловой электростанции мощностью 500 МВт, работающей по циклу Ренкина, может быть снижена от 38°C до 24°C [8]. Использование градирни для работы по М-циклу (рис. 6а) потребует незначительных изменений в конструкции насадки градирни (рис. 6в). В этом случае вода будет охлаждаться до 13°C, потребный расход воды через градирню снизится на 44%, а расход воды на подпитку градирни вследствие потерь на испарение – на 20%. В целом, в районах с низкой и умеренной влажностью воздуха (20–50%) при использовании цикла Майсоценко потребный расход воды в градирне энергоблока 400 МВт уменьшается на 47–33%, и только при влажности воздуха более 60% он становится примерно одинаковым с традиционной градирней. Отметим, что проблема снижения потребления воды в ближайшее время станет особенно актуальной для тепловой и атомной энергетики Украины, где широко используются паровые турбины, а запасы пресной воды ограничены.

Энергоблоки мощностью 300 МВт составляют около 44% мощности всех энергоблоков Украины. Расчеты показывают, что дополнительное снижение температуры охлаждаемой воды на 11°C в градирне по М-циклу позволяет при годовой работе такого энергоблока получить экономию более 400 000 долл. США за счет повышения КПД станции и сопутствующей экономии топлива (более 1 долл. США на 1 кВт установленной мощности). Потребный расход оборотной воды при этом снизится на 25–30%, что также способствует повышению экономичности энергоблока. Если рассматривается увеличение производства электрической энергии при сохранении расхода воды через градирню (продажная цена 0,036 долл. США за 1 кВт·ч), то экономический выигрыш составит более 500 000 долл. в год. В масштабе Украины использование градирен нового поколения в составе всех энергоблоков мощностью 200 и 300 МВт позволит получить экономию более 25 млн долл. США в год.

Применение цикла Майсоценко в промышленных градирнях не ограничено использованием воздуха окружающей среды. В технологических процессах могут использоваться азот, двуокись

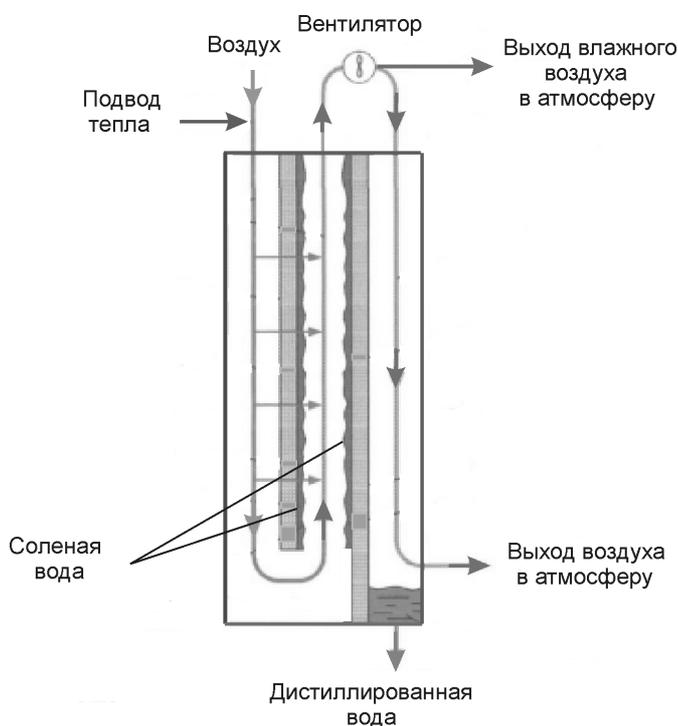
углерода, промышленные газы, а в качестве охлаждающей жидкости – промышленные стоки, морская и засоленная вода.

При модернизации в градирне по М-циклу сохраняется корпус традиционной градирни (80% стоимости), а изменяются только внутренняя насадка и способ подачи воздуха в объем градирни (через насадку). Стоимость насадки по М-циклу составляет около 100 долл. США за 1 м<sup>3</sup> объема (или 150-200 тыс. долл. США для энергоблока 300 МВт), модернизация подвода воздуха и прочие расходы могут составить около 100 тыс. долл. США. Учитывая экономию на уровне 400 000 долл. США в год за счет более глубокого охлаждения воды в градирне энергоблока 300 МВт, можно сделать вывод, что срок возврата инвестиций составит не более одного года.

Большие экономические выгоды могут быть получены и в других областях экономики Украины [14]. Уменьшение на 1°C температуры воды на охлаждение промышленного компрессора приводит к снижению на 4,5% электрической мощности на его привод. Снижение на 1,7°C температуры охлаждаемой воды при производстве монофосфата (от 25,6°C до 23,9°C) приводит к увеличению производительности предприятия на 12 тонн в час, или на 7,7%. Крупный химический комбинат теряет более 25 млн долл. США в год из-за снижения производительности только потому, что температура воды на выходе из градирни на 3°C больше ее проектного значения.

Большой интерес для Украины представляют установки для производства пресной воды из морской и засоленной воды, промышленных стоков, а также установки для экстрагирования влаги из атмосферного воздуха. В опреснителях на основе М-цикла (рис. 7) подогретый воздух подается в сухие рабочие каналы аппарата Майсоценко (рис. 2), затем проходит через влажные каналы, где достигает насыщенного состояния с высоким уровнем влажности, и частично охлаждается. Насыщенный воздух частично подается в сухие ка-

налы охлаждения, где происходит его охлаждение (теоретически до точки росы) и конденсация влаги. Расчеты показывают [8], что стоимость производства 1 тонны пресной воды составляет около 0,25 долл. США, что значительно дешевле, чем при использовании широко используемой технологии обратного осмоса. Такие установки могут широко использоваться при утилизации низкопотенциальной тепловой энергии в промышленности (80-120°C), которая в большом количестве выбрасывается в атмосферу (промышленные газы, системы кондиционирования и др.).



**Рис. 7. Схема установки по М-циклу для получения пресной воды из морской и засоленной воды, промышленных стоков [5, 6].**

Для Украины большой интерес представляют водогрейные установки и котлы с экологически чистой горелкой (рис. 8), которая использует воздух высокой влажности (30% и более). В этом случае в тепломассообменном аппарате Майсоценко утилизируется выхлопная теплота и влага из продуктов сгорания, а отработанный воздух высокой влажности используется в горелке для сжигания природного газа.

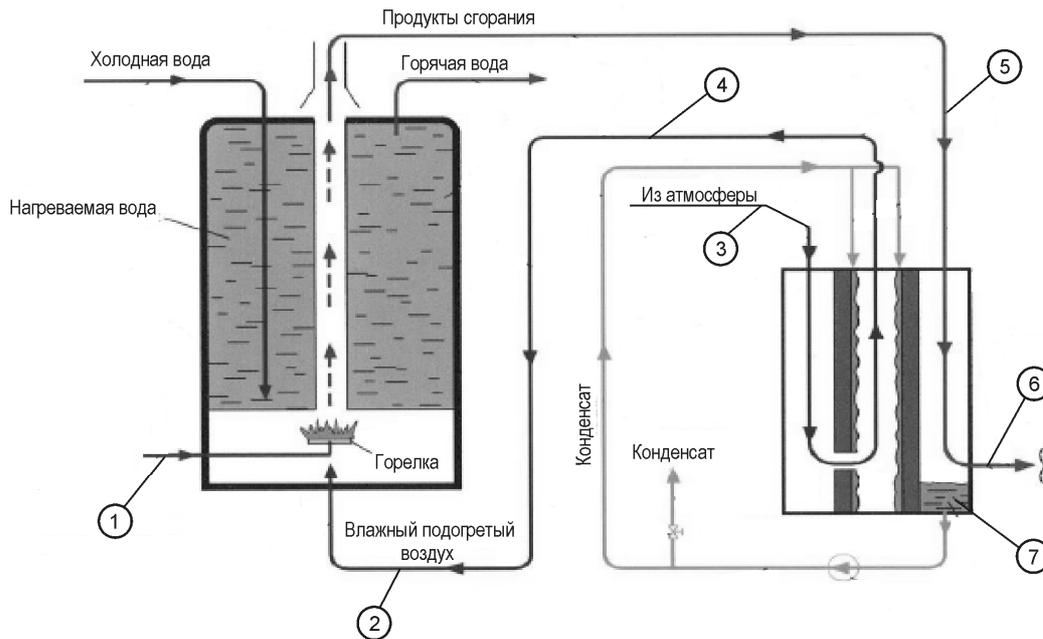


Рис. 8. Нагреватель воды с горелкой, использующей воздух высокой влажности [5, 6].

Устройства на основе М-цикла могут эффективно использоваться в тепловых насосах. Постановка теплообменного аппарата Майсоценко взамен традиционного конденсатора позволит охлаждать хладагент до более низкой температуры и увеличить тепловой поток в процессе конденсации. За счет этого на производство холода летом может затрачиваться почти в 2 раза меньше электроэнергии, а зимой производится в 2 раза больше теплоты, чем при использовании традиционных тепловых насосов. Большие перспективы имеет использование М-цикла при охлаждении мощного электронного оборудования, которое характеризуется значительным тепловыделением [7].

Большой интерес для нетрадиционной энергетики Украины представляет эксергетическая башня Майсоценко [8]. Она может быть использована для выработки электроэнергии, холодного воздуха и холодной воды. Схема эксергетической башни на основе М-цикла представлена на рис. 9. Она состоит из двух вертикальных концентрических цилиндров, причем внешняя часть внутреннего цилиндра покрыта капиллярно-пористым материалом и орошается водой. "Толчок" процессам тепло- и массообмена в башне дает вынужденная подача воздуха из окружающей среды во внутренний цилиндр (вентилятор) и испарение воды с внешней поверхности внутреннего цилиндра. В центральном канале башни поток за счет

охлаждения движется сверху вниз, а при нагреве в кольцевом канале – снизу вверх с увеличением влажности.

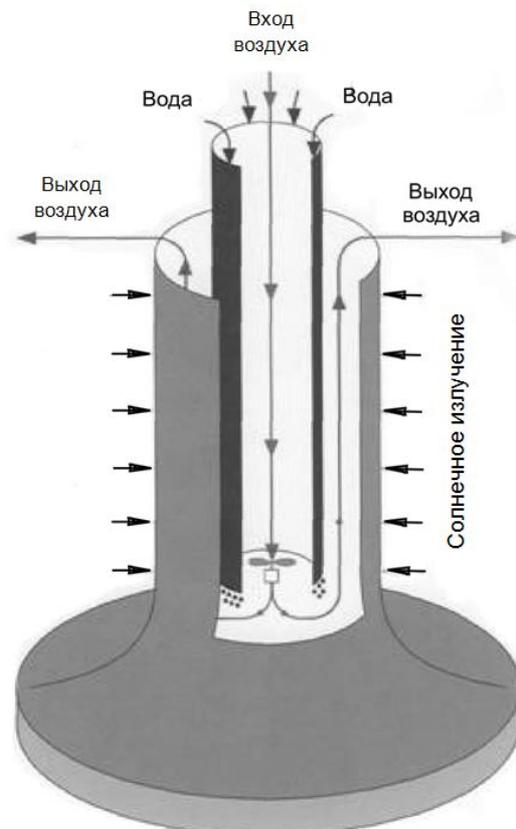


Рис. 9. Эксергетическая башня по циклу Майсоценко [8].

Использование большой психрометрической разности температур в качестве движущей силы процессов тепло- и массообмена принципиально отличает эксергетическую башню Майсоценко от

"сухих" энергетических башен большой высоты. Вследствие испарения воды в кольцевом канале масса потока на выходе значительно превышает массу входящего воздуха, что увеличивает скорость воздушного потока в башне. Установка ветроагрегата в нижней части башни позволит производить электрическую энергию. Работа такой установки протекает круглосуточно и не зависит от скорости ветра в окружающей атмосфере. Расчеты показывают, что эксергетическая башня высотой 10 м способна производить до 25 кВт·ч электроэнергии ежедневно. Фактически любая индустриальная труба, снабженная устройством на основе М-цикла, может быть использована для выработки электроэнергии, охлажденного воздуха (если отбирать часть воздуха в нижней части градирни) и охлажденной воды.

В соответствии с рис. 1, наименьшая температура воздуха и воды в цикле Майсоценко достигается в нижней части башни. Этот факт может быть использован для производства охлажденного воздуха и холодной воды.

### 3. М-цикл в газотурбостроении Украины.

Газовые турбины широко используются в энергетике, авиации, судостроении, а также в качестве механического привода различных систем. Сегодня до 70% прироста новых электрогенерирующих мощностей в мире обеспечивается за счет газотурбинных (ГТУ) и парогазовых установок (ПГУ). С использованием ГТУ и ПГУ в мире вырабатывается более 20% электроэнергии, в США к 2020 г. около 40% электроэнергии будет производиться за счет ГТУ и ПГУ. В развитых странах удельный вес использования ГТУ для покрытия пиковых и полупиковых нагрузок уже достиг 30% установленных мощностей. В энергетике Украины газовые турбины пока не используются, на газотранспортной системе Украины установлены более 450 газовых турбин общей мощностью более 4,5 ГВт.

Несмотря на высокую степень термодинамического совершенства, КПД мощных энергетических газотурбинных установок простого цикла не превышает 40% (ГТУ SGT5-800H, 375 МВт, *Siemens*, Германия). Одной из главных проблем при создании таких турбин является

создание осевых компрессоров с высоким (до 800 кг/с) расходом воздуха.

Для повышения КПД ГТУ используются различные методы, основные из которых – рост температуры продуктов сгорания перед турбиной и повышение степени сжатия воздуха в компрессоре. Большое распространение получают сложные термодинамические циклы – парогазовый цикл, впрыск пара в камеру сгорания и в проточную часть турбины, регенерация теплоты на выходе из турбины, промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре и промежуточный нагрев продуктов сгорания в газовой турбине. Сегодня КПД самой мощной парогазовой установки (570 МВт), выполненной на основе ГТУ SGT5-800H (*Siemens*, Германия), составляет 60%. На ее создание потребовалось 7 лет и более 550 млн евро инвестиций.

Украина входит в десятку развитых стран мира, имеющих полный цикл проектирования и серийного производства газовых турбин среднего класса для энергетики, авиации, судостроения и механического привода на газотранспортной системе. Предприятие ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект" (г. Николаев) занимает ведущее положение в мире на рынке газовых турбин морского назначения, там же более 50 лет серийно производятся газотурбинные установки мощностью 2,5-25 МВт. Для энергетики разработана и эксплуатируется в России ГТУ-110 МВт с КПД 52%, в стадии испытаний находится энергетическая ГТУ-45/60 мощностью 45 и 60 МВт. Авиационные двигатели ГП "Ивченко-Прогресс" (г. Запорожье) экспортируются во многие страны мира, более 800 газоперекачивающих агрегатов производства Сумского НПО им. М.В.Фрунзе уже более 40 лет эксплуатируются на газопроводах стран бывшего СССР. В ОАО "Турбоатом" (г. Харьков) созданы несколько проектов энергетических ГТУ и ПГУ, мощных паровых турбин для атомной энергетики.

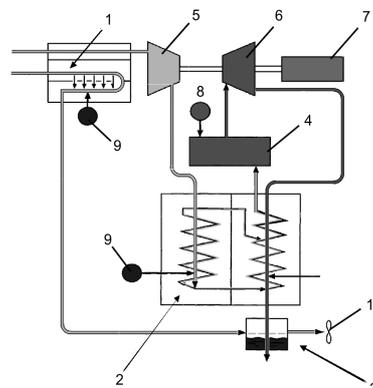
В Украине (ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект") имеется большой опыт проектирования и создания проектов ГТУ сложного цикла – парогазовых установок среднего класса мощностью 13,5-25 МВт (КПД=45,8-48,5%), ГТУ по циклу *STIG* мощностью 4,3-40 МВт с впрыском пара в камеру сгора-

ния и проточную часть турбины (КПД = 35,5-42,8%), разработан проект регенеративного ГТД мощностью 16 МВт с КПД на уровне 40% при температуре газа на входе в турбину 980°C. На базе ГТУ простого цикла (10 МВт, КПД = 36%) создана и с 1993 г. эксплуатируется на газотранспортной системе Украины газотурбинная установка "Водолей-16К" мощностью 16 МВт с КПД = 42,1% [10]. На выходе установки установлен контактный конденсатор, утилизирующий большую часть выхлопной теплоты и обеспечивающий возврат конденсата в цикл, а также воды, образующейся при сгорании природного газа. Коэффициент возврата воды в цикл более единицы сохраняется до температуры окружающей среды +25°C. Температура охлажденных продуктов сгорания на выходе из установки "Водолей-16К" составляет +43-45°C и близка к температуре мокрого термометра окружающей среды. Расчеты показывают, что при температуре газа перед турбиной 1350-1400°C КПД установки "Водолей" может составить более 50%.

Циклы газовых турбин с увлажнением воздуха (*STIG*, *HAT*, *CHAT* и др.) характеризуются высокими технико-экономическими показателями, но имеют сложную инфраструктуру. По этой причине они пока не получили большого распространения. В частности, они требуют двух отдельных и достаточно металлоемких аппаратов (нагревателя воздуха и увлажнителя), четырех крупногабаритных теплообменников, а также много вспомогательного оборудования, что повышает стоимость установки и производимой электроэнергии, снижает ее надежность. Другая проблема – использование в цикле большого количества химически очищенной воды, которая безвозвратно выбрасывается в атмосферу. В результате повышается влажность воздуха вблизи работающей газотурбинной установки, что приводит к экологическим проблемам и наносит вред здоровью человека.

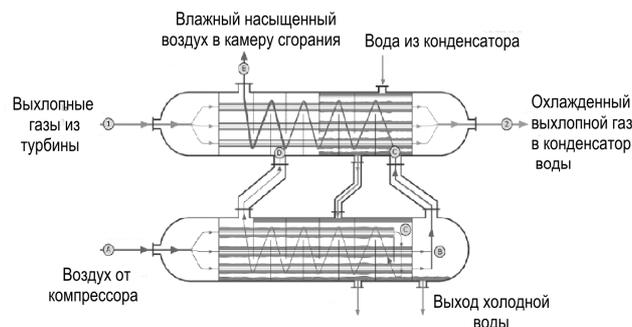
Влажность воздуха, подаваемого в камеру сгорания в циклах *STIG*, *HAT*, *CHAT*, не превышает 20%. В цикле Майсоценко очень высокая влажность воздуха (30% и более) достигается в одном аппарате, он более компактный, более дешевый и более технологичный в изготовлении, характеризуется высокой интенсивностью тепло- и массообмена.

В работе [8] рассмотрена одна из возможных схем газотурбинной установки на основе М-цикла (рис. 10). Применение двух аппаратов косвенно-испарительного охлаждения решает одновременно



**Рис. 10.** Газотурбинная установка с охлаждением воздуха на входе в компрессор, увлажнением воздуха на входе в камеру сгорания и утилизацией теплоты и влаги уходящих газов [8]: 1 – теплообменник Майсоценко (рис. 2); 2 – теплообменник Майсоценко (рис. 11); 3 – конденсатор воды.

несколько важных задач. Во-первых, снизить "нижнюю" температуру цикла до температуры, близкой к точке росы и, тем самым, существенно повысить КПД установки без увеличения температуры газа перед турбиной. Одновременно утилизируются "выбросная" теплота, вода, подводимая в цикле, и водяной пар из продуктов сгорания. Во-вторых, получить очень высокую степень увлажнения сжатого воздуха (30% и более) на входе в камеру сгорания. Известно, что при использовании пара высокой влажности улучшаются процессы сгорания топлива, в несколько раз снижается уровень вредных выбросов в атмосферу [11], увеличивается мощность газотурбинной установки. В газотурбинной установке используется другой тип теплообменного аппарата Майсоценко, схема которого представлена на рис. 11. В-третьих,



**Рис. 11.** Теплообменник Майсоценко для утилизации теплоты и водяного пара из продуктов сгорания газотурбинной установки.

снижается температура воздуха перед компрессором установки в жаркое время года, что также повышает КПД установки. Это охлаждение достигается без увлажнения воздуха, которое характерно для большинства известных технологий охлаждения входного воздуха.

Как следует из теории газотурбинных установок, при температуре окружающей среды более +15°C каждое снижение температуры входного воздуха на 1°C приводит к увеличению КПД газотурбинной установки на 0,5-0,7%. Чем холоднее воздух, тем он более плотный, что определяет более высокий расход воздуха и степень сжатия в компрессоре. Вода, используемая для охлаждения входного воздуха, и отработанный влажный воздух утилизируется и вновь используется в цикле.

Цикл Майсоценко может быть использован как в микротурбинах, так и в газовых турбинах большой мощности. При этом высокое значение КПД газотурбинной установки сохраняется даже при частичной нагрузке турбины до 50%, т.е. такие турбины могут широко использоваться для компенсации пиковых и полупиковых нагрузок. Важным преимуществом М-цикла по сравнению с парогазовым циклом является факт, что высокое значение КПД на уровне 60% достигается без использования дополнительной паровой турбины, конденсатора и других металлоемких устройств, связанных с практической реализацией парогазового цикла.

В настоящее время исследования термодинамики газотурбинной установки на основе М-цикла находятся в начальной стадии. Тем не менее, даже первые исследования цикла показали его несомненные преимущества по сравнению с циклами *НАТ*, *СНАТ* и др. Как указывалось выше, в ГТУ на основе М-цикла охлаждение продуктов сгорания происходит до температуры близкой к точке росы, т.е. рост термического КПД происходит за счет "нижней" температуры цикла, что конструктивно более просто. Высокий уровень увлажнения воздуха (до 30%) существенно снижает выбросы окислов азота в окружающую среду. Расчеты и опыты показывают, что при увеличении влажности воздуха с 3 до 39% выбросы окислов азота снижаются в 13,5 раз [11]. Это обусловлено более высоким значением теплоемкости

парогазовой смеси, а также более равномерным температурным полем в камере сгорания без локальных "пиков" температуры. Кроме того, даже небольшая диссоциация водяного пара на водород и кислород способствует значительной интенсификации процессов горения.

Термический КПД цикла газотурбинной установки при ее модификации и одинаковом тепловыделении в базовой (цикл Брайтона) и модифицированной (цикл Майсоценко) установке определяется уравнением [8]:

$$\eta_M = 1 - [(t_{out.M} - t_{amb}) / (t_{out.B} - t_{amb})] (1 - \eta_B) (m_2 / m_1), \quad (1)$$

где  $t_{out.M}$ ,  $t_{out.B}$  – выходная температура по циклам Майсоценко и Брайтона;  $\eta_B$  – действительный термический КПД цикла Брайтона;  $m_2$ ,  $m_1$  – расход рабочего тела через газовую турбину по циклам Майсоценко и Брайтона.

В качестве примера рассмотрим энергетическую газовую турбину UGT-25 мощностью 25 МВт производства ГН НПКГ "Зоря"-Машпроект". Температура продуктов сгорания на входе – 1350°C, на выходе – 465°C, теоретический КПД цикла Брайтона – 0,48, действительный КПД – 0,37, КПД цикла Карно – 0,815. При постановке на выходе из газотурбинной установки теплообменного аппарата Майсоценко отношение  $m_2/m_1$  находится в пределах 1,1-1,2 [4]; для дальнейших расчетов принимаем  $m_2/m_1 = 1,2$ . Тогда из уравнения (1) для температуры окружающей среды  $t_{amb} = 27^\circ\text{C}$  следует:

$$\eta_M = 1 - 1,92 \cdot 10^{-3} (t_{out.M} - 27^\circ\text{C}).$$

В М-цикле вследствие высокой влажности потока в газовой турбине температура конденсации на выходе из турбины (точка росы) будет составлять 80-120°C, которую можно принять в качестве температуры  $t_{out.M}$ , что значительно выше точки росы окружающей среды (10-15°C). Тогда для среднего значения  $t_{out.M} = 100^\circ\text{C}$  и  $t_{out.M} - t_{amb} = 73^\circ\text{C}$  получим:  $\eta_M \approx 86\%$ , т.е. около 86% химической энергии топлива могут быть полезно использованы в газотурбинной установке на основе М-цикла. Это существенно больше, чем в идеальном цикле Брайтона и даже больше, чем в цикле Карно.

Более высокий идеальный термический КПД М-цикла по сравнению с циклом Карно объясняется принципиальным различием между ними как предельными термодинамическими циклами. В цикле Карно используется одно рабочее тело, которое последовательно проходит сжатие, подвод теплоты (горение), расширение и охлаждение до температуры влажного термометра окружающей среды. Цикл Майсоценко использует два различных рабочих тела – воздух в компрессоре и влажные продукты сгорания в газовой турбине с различными расходами, причем каждое из них работает в условиях, близких к оптимальным. Предельной температурой в М-цикле является температура точки росы, которая ниже, чем температура мокрого термометра окружающей среды.

Использование двух различных рабочих тел – воздуха в компрессоре и влажных продуктов сгорания в газовой турбине – имеет и другие преимущества. Поскольку после компрессора в воздух добавляется влага, то, чтобы сохранить расход воздуха, соответствующий базовой турбине, необходимо сжимать меньший массовый расход воздуха, т.е. можно использовать компрессор меньшей мощности. При заданном массовом расходе смесь продуктов сгорания и влаги имеет меньшую плотность, чем продукты сгорания и за счет присутствия водяного пара характеризуется большей степенью расширения. Так как объемный расход рабочего тела через газовую турбину возрастает, то ее мощность также увеличивается.

Эксперименты показали, что потери давления в выходном теплообменном аппарате слабо влияют на общий КПД установки; при постановке двух последовательных аппаратов, что может диктоваться условиями эксплуатации, термический КПД цикла уменьшается всего на 2-3%.

Украина, имеющая достаточно большой опыт создания газовых турбин сложного цикла с использованием влажного воздуха (*STIG*, "Водолей"), может занять лидирующее положение в мире на рынке газовых турбин, положив М-цикл в основу разработки энергетических и приводных газовых турбин следующего поколения. В качестве первого шага могут быть использованы микротурбинные установки.

В 2005 г. в США были выполнены испытания микротурбинной установки Capstone C30 мощностью 30 кВт (*Department of Water and Power of the City Los Angeles Distribution Power Unit* совместно с *Coolerado Corporation*). Эксперименты показали, что при использовании входного охладителя на основе М-цикла снижение температуры воздуха составило 8°C (от 32°C до 24°C). В режиме максимальной мощности увеличение мощности составило 8,8%, а в режиме максимального КПД мощность возросла на 11,7%. Что касается КПД микротурбинной установки, то в первом случае он возрос на 3,4%, а во втором – на 0,2%.

Для более масштабной отработки газотурбинной установки, работающей по М-циклу, может быть использована действующая на Газотранспортной системе Украины установка "Водолей-16К", которая имеет для этого всю необходимую инфраструктуру. При ее модернизации в соответствии со схемой рис. 5 будут установлены два аппарата косвенно-испарительного охлаждения – на входе в компрессор и на выходе из газовой турбины. В жаркое время года только за счет охлаждения входного воздуха повышение КПД приводной газотурбинной установки может составлять 10-12%, что в масштабе Газотранспортной системы Украины эквивалентно ежегодной экономии природного газа около 900 млн м<sup>3</sup> стоимостью более 400 млн долл. США. В целом КПД ГТУ по М-циклу может составить 60% и более.

Важным этапом такой работы может стать термодинамический и технико-экономический анализ установки при ее переводе на М-цикл с использованием в камере сгорания воздуха высокой (30% и более) влажности. Самостоятельный интерес представляет использование в установке "Водолей-16К" системы очистки воды по М-циклу (около 800 тонн воды используется в цикле, которая требует периодической химической регенерации), а также регенерация воды на входе в компрессор из отработанного влажного пара.

Недавно в ГП НПКГ "Зоря" – "Машпроект" (Николаев) разработан проект газотурбинного двигателя для газотранспортной системы Украины мощностью 16 МВт с воздушно-воздушным регенератором на выходе. При температуре продуктов

сгорания перед турбиной 980°C КПД составил около 40%. Однако если в такой установке будет использован теплообменник аппарат Майсоценко, то КПД турбины может увеличиться до 55%.

Одним из наиболее перспективных и масштабных приложений М-цикла может стать охлаждение компримированного (сжатого) природного газа на компрессорных станциях, которых на территории Украины более 80. Решение этой проблемы, которая до сих пор базируется на использовании неэффективных, громоздких и энергозатратных аппаратов воздушного охлаждения (АВО), позволит достичь большого экономического эффекта в масштабе Украины. Для сведения укажем, что одна компрессорная станция использует в среднем 300 кВт установленной электрической мощности, главным образом, на привод вентиляторов АВО, охлаждающих компримированный газ до 45°C. Стоимость одного АВО составляет более 35 000 долл. США, причем в среднем на одной компрессорной станции установлены 12-14 АВО. В течение года (работа 6000 часов в год) только на оплату электроэнергии для их работы на одной компрессорной станции расходуются более 250 000 долл. США. Предварительные расчеты показывают, что решение этой проблемы на основе аппаратов, использующих цикл Майсоценко, экономически целесообразно с возвратом инвестиций на уровне 1-2 лет.

**4. Научные программы.** В настоящее время теоретические и прикладные исследования цикла Майсоценко активно изучаются в странах Европы, Азии, Австралии, Южной и Северной Америки. В частности, в США интенсивные научно-исследовательские, конструкторские и прикладные работы в содружестве с университетами, научно-исследовательскими и промышленными организациями США и других стран выполняются в Институте газовых технологий (*Gas Technology Institute, GTI*) и Компании *Idalex Corporation* (Денвер).

Промышленное использование цикла Майсоценко в Украине потребует научных исследований в области теплофизики, горения топлив, материаловедения, теории газовых турбин и других наук, которые могут быть выполнены в институтах Национальной академии наук Украины. По-

требуется также последующее научное сопровождение институтами НАН Украины при создании новых установок в содружестве с украинскими бизнес-структурами. Ведущей конструкторской организацией по проектам в области газотурбостроения может стать ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект" с привлечением ведущих организаций США и Европейского Союза.

В 2011 г. в рамках научно-технического сотрудничества подписано Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между Отделением физико-технических проблем энергетики НАН Украины (ОФТПЭ НАНУ), Компанией *Idalex Corporation* (США) и Институтом газовых технологий (*GTI, США*), в программу которого включены вопросы исследования М-цикла и его использования в промышленности Украины. Институты ОФТПЭ НАНУ будут привлечены к изучению цикла Майсоценко и его использованию в градирнях нового поколения, при охлаждении компримированного природного газа на ГТС Украины, в энергетических и приводных газотурбинных установках, при опреснении воды и утилизации вторичных энергоресурсов, в горелках, использующих воздух высокой влажности и в некоторых других приложениях.

**5. Выводы.** Цикл Майсоценко открывает широкие возможности для совершенствования многих энергетических и теплообменных процессов без совершения внешней работы. Для охлаждения воздуха в системах кондиционирования до температуры близкой к точке росы используется относительно простое оборудование. М-цикл может найти широкое использование в Украине в системах кондиционирования, промышленных градирнях, конденсаторах, тепловых насосах, солнечных и ветровых установках, установках опреснения и очистки воды, в двигателях внутреннего сгорания, газовых турбинах, системах охлаждения электроники. Устройства на основе М-цикла имеют более высокие технико-экономические показатели и оказывают менее вредное воздействие на окружающую среду.

Большие перспективы для Украины имеет использование М-цикла при модернизации тепловой энергетики Украины, в частности, в градирнях. Дополнительное снижение температуры ох-

лаждаемой воды только на 1°C в градирне по М-циклу позволяет при годовой работе энергоблока мощностью 300 МВт получить экономию более 36 000 долл. США в год за счет повышения КПД станции и экономии топлива. Значительной экономии работы энергоблока способствует снижение расхода воды за счет увеличения глубины ее охлаждения.

Применение М-цикла в газотурбостроении позволяет снизить "нижнюю" температуру термодинамического цикла и повысить КПД цикла без увеличения температуры на входе в турбину, относительно простыми методами существенно снизить выбросы двуокиси азота в атмосферу, уменьшить работу на привод компрессора и повысить мощность газовой турбины. Снижение температуры воздуха на входе в компрессор может служить эффективным средством изменения мощности газотурбинной установки в период пиковых и полупиковых нагрузок. В цикле Майсоценко обеспечивается полный возврат воды в цикле, в том числе, из продуктов сгорания.

В качестве пилотных проектов для оценки основных преимуществ и технико-экономических показателей газотурбинной установки с М-циклом на первом этапе могут быть использованы микротурбинные установки, а на втором – установка "Водолей-16К", которая с 1993 г. эксплуатируется на газотранспортной системе Украины. Ведущей организацией по таким проектам в содружестве с организациями США и Европы может стать украинское предприятие ГП НПКГ "Зоря"– Машпроект", в котором был создан и реализован проект установки "Водолей-16К", а научное сопровождение проектов могут обеспечить институты Национальной академии наук Украины.

В целом, широкое использование М-цикла в различных отраслях промышленности Украины в самой ближайшей перспективе может создать предпосылки для формирования новой стратегии

энергосбережения в Украине.

1. Chandracant, W. et al., (2012) A Review on Potential of Maisotsenko Cycle in Energy Saving Applications Using Evaporative Cooling, *Int. Journ. of Advance Research in Science*. – Vol. 01. – Issue 01. – P. 15–20.
2. Galiskan, H. et al., (2011) Thermodynamic Performance Assessment of a Novel Air Cooling Cycle: Maisotsenko Cycle, *International Journal of Refrigeration*, doi:10.1016/j.ijrefrig.2011.02.001
3. Gillan, L., Maisotsenko, V., (2003) Maisotsenko Open Cycle Used for Gas Turbine Power Generation. *Proceedings of ASME Turbo-Expo*, Atlanta, USA, June 2003, Paper No. GT2003-38080. – P. 75–84.
4. Gillian L., (2008) Maisotsenko Cycle for Cooling Processes, *Clean Air*, 9, 1-18.
5. Idalex Technologies Inc., (2010a) The Maisotsenko Cycle – Conceptual. [http://idalex.com/technology/how\\_it\\_works\\_-\\_engineering\\_perspective.htm](http://idalex.com/technology/how_it_works_-_engineering_perspective.htm).
6. Idalex Technologies Inc., (2010b) The Maisotsenko Cycle – Basic. [http://idalex.com/technology/how\\_it\\_works\\_-\\_engineering\\_perspective.htm](http://idalex.com/technology/how_it_works_-_engineering_perspective.htm).
7. Maisotsenko, V., Reizin, I., (2005) The Maisotsenko Cycle for Electronic Cooling, *Proceedings of IPACK2005*, ASME InterPack'05, July 17-22, San-Francisco, California, USA. – P. 1–10.
8. Maisotsenko, V., Gillan, L., Kozlov, A., (2010) The Maisotsenko Cycle for Power Generation, Waster Energy Recovery, and Water Reclamation, *Proc. of Clean Energy Supercluster Forum*, October 25, Fort Collins, CO, IDALEX Inc. USA. – 41 p.
9. NREL, (2003) National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy by Midwest Research Institute, Battelle, Bechnel. <http://www.nrel.gov/vm@idalex.com>.
10. *Product Catalog "Zorya"-Mashproekt* (Ukraine), (2009). – 55 p.
11. Soroka B.S., (1993) Method for Accounting for the Effect of Composition and Parameters of the Mixture on the Formation of Nitrogen Oxides in Combustion Processes, *Journal Ecological Technologies and Resource* (Russia). – №6. – P. 47–53.
12. Wickler, K., (2003) Life Below the Wet Bulb: Maisotsenko Cycle, *Power Magazine*, November/December. – P. 1–3.
13. Zhan, C. et al., (2011) Comparative Study of the Performance of the M-Cycle Counter-flow and Cross Flow Heat Exchangers for Indirect Evaporative Cooling – Paving the Path Towards Sustainable Cooling of Buildings, *Energy*. – Vol. 36. – P. 6790.
14. Burger Robert, (2000, August 29) Profits And Cold Water, *Engineered Systems Magazine* (ES).