

УДК 518.5:532.54

К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В БЕЛАРУСИ

**Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,
доктора техн. наук, профессора РОМАНЮК В. Н., СЕДНИН В. А.,
аспиранты БОБИЧ А. А., МУСЛИНА Д. Б., БУБЫРЬ Т. В.**

Белорусский национальный технический университет

E-mail: rector@bntu.by

Рассматриваются ключевая энергетическая проблема современности – рациональное и эффективное использование энергоресурсов – и возможность ее решения на базе концепции интенсивного энергосбережения. Выделяется один из путей решения задачи снижения потребления первичных энергоресурсов в Беларуси. Анализируется исходное состояние на пути дальнейшего совершенствования энергопотребления, который необходимо пройти до 2030 г. Для Беларуси показана ведущая роль в энергосбережении мероприятий по повышению эффективности потребления природного газа.

Выносятся на обсуждение возможность использования побочных энергопотоков промышленных предприятий средне- и низкотемпературных, коммунальных и промышленных канализационных стоков, что ставит задачу перехода к принципиально новой системе теплоснабжения предприятий и городов, использующей побочные тепловые потоки, в том числе и низкотемпературные тепловые потоки промышленных предприятий, коммунального хозяйства, рассеиваемые в настоящее время в окружающей среде. Затрагиваются системные изменения, связанные с вовлечением побочных низкотемпературных тепловых потоков в процесс генерации тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения при использовании для этого абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, сопрягаемых как с котельными, так и с ТЭЦ. Приведены многочисленные примеры возможного использования тепловых промышленных выбросов и канализационных стоков для снижения расхода топлива при генерации тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения. Показано, что подобное расширение энергосберегающей базы не только обеспечивает снижение потребления первичного энергоресурса теплогенерирующими источниками, но и существенно улучшает условия для работы энергосистемы Беларуси в части регулирования мощности и загрузки мощностей с вводом в строй АЭС. Рассматривается существующая техническая база, обеспечивающая предлагаемые изменения.

Ключевые слова: энергообеспечение, системы теплоснабжения, энергоресурсы, энергосбережение.

Библиогр.: 16 назв.

TO THE SUBJECT OF DEVELOPMENT OF POWER SUPPLY PROCESS FOR INDUSTRIAL HEAT TECHNOLOGIES AND HEAT SUPPLY SYSTEMS IN BELARUS

**KHROUSTALEV B. M., ROMANIUK V. N., SEDNIN V. A., BOBICH A. A.,
MUSLINA D. B., BUBYR T. V.**

Belorussian National Technical University

Considers the current key energy problem – the rational and efficient use of energy resources, and the possibility of its solution, based on the concept of intensive energy conservation. As a result, the way of primary energy consumption reduction in Belarus is provided. The initial situation in the frame of program of further improvement of energy consumption until 2030 is estimated. It is shown, that for Belarus the first place in energy saving measures takes the efficiency improvement of natural gas consumption, what allows reducing the investment and saving energy resources.

The possibility of usage of waste energy flows of medium-and low-temperature from industrial and municipal enterprises are discussed. To realize the described possibilities, some changes of heat supply system of enterprises and plants are required. Changes in heat supply system of the industrial enterprises, related with usage of low-temperature waste energy flows in a thermal energy generation process for heating, require the installation of additional equipment in existing heat energy supply system, such as absorption heat pumps, which are easily joint and successfully work at boiler Houses as well as at CHP. The numerous examples of fuel consumption reduction via heat industrial waste and sewage usage are shown in this article. It must be emphasized, that such an expansion of energy-saving framework not only reduce the primary energy consumption by heat generating sources, but also significantly improves the conditions of the Belarusian electrical grid operation under the conditions of nuclear power plant commissioning. The existing technical framework, that ensured the proposed changes, is also taking into account.

Keywords: power supply, heat supply systems, energy resources, energy saving measures.

Ref.: 16 titles.

Введение. В связи с необходимостью разработки новой долгосрочной стратегии совершенствования экономики Беларуси на период до 2030–2050 гг., гармонично сочетающего инновационные и эволюционные изменения хозяйственного механизма, чрезвычайно актуально определиться с тенденциями дальнейшего развития систем тепло- и энергоснабжения промышленности, предприятия которой в основной массе используют теплотехнологии. Уже к 2015–2020 гг. в мире прогнозируется резкий рост стоимости всех ресурсов, что вызовет падение производства на фоне растущего загрязнения окружающей среды и вызванное им изменение климата [1, 2]. В этой связи разработка первоочередных мер по подготовке экономического механизма страны к грядущим изменениям на сырьевых и энергетических рынках и необходима, и очень своевременна.

В процессе дискуссий по глобальным вопросам (к примеру: Как будет изменяться энергообеспечение промышленных теплотехнологий того или иного назначения? Какие системы теплоснабжения должны иметь место в стране к завершению указанной обозримой перспективы и каким путем можно осуществить переход к эффективным системам теплоснабжения?) должно сформироваться четкое понимание того, как ответить на традиционный и, пожалуй, самый главный вопрос: Что делать в ближайшие годы? По мнению авторов, неизбежно расширение связи систем теплоснабжения как с иными системами жизнеобеспечения городов, так и с теплоэнергетическими системами промышленных теплотехнологических предприятий,

расположенных в этих городах. Для снижения энергопотребления хозяйственным механизмом, согласно концепции интенсивного энергосбережения, требуется расширение энергосберегающей базы, и в этом контексте недостаточно существующего сегодня уровня связи взаимодействия систем централизованного теплоснабжения с промышленным комплексом, который осуществляется в основном лишь посредством теплоэлектроцентралей. Можно утверждать, что в настоящее время нет достаточно значимого взаимодействия между системами, непосредственно связанными с жизнеобеспечением кластеров урбанизации, например систем теплоснабжения, с системами очистки канализационных стоков. Нет такового взаимодействия и систем централизованного теплоснабжения городов с теплоэнергетическими системами промышленных предприятий. Вместе с тем, время диктует необходимость расширения связей всех перечисленных систем, что создаст условия для достижения более полной реализации энергосберегающего потенциала хозяйственного комплекса.

Наконец, наряду с безусловным выполнением своего функционального предназначения систем теплоснабжения в их дальнейшем эффективном развитии следует определиться с выбором целевой функции энергообеспечения систем централизованного теплоснабжения: сохранение окружающей среды, стабильность и успешное существование систем, минимум потребления топлива и др. Важен и ответ на вопрос: На какое топливо ориентироваться? Ведь первичные энергоресурсы конечны, при этом разнятся и темпы изменения стоимости их различных видов, запасы и темпы убыли последних. Ускоренный рост промышленного производства, вызванный увеличением численности населения Земли и его нужд, определил лавинообразное увеличение потребления энергоресурсов, достигшего беспрецедентно высокого уровня: за 30 лет (1975–2005 гг.) земляне потребили первичных энергоресурсов больше, чем за все предыдущее существование цивилизации [3]. Последнее десятилетие только усилило картину. Энергетический комплекс любой технически развитой страны инерционен. Ресурсы, время, требуемые на его изменение, колоссальны. В этой связи ставка на топливо, которое по разным причинам может стать недоступным, связана с серьезными рисками. Предельно допустимый вес одного первичного энергоресурса в энергобалансе страны не должен превышать 50 % [4]. Для ответа на поставленные вопросы надо знать, чем располагаем в настоящее время для неизбежного дальнейшего развития.

Исходное состояние. Безусловно, развитие систем теплоснабжения, на которые приходится до 40 % потребляемых в Беларуси топливно-энергетических ресурсов, должно быть связано с энергосбережением. Сегодня необходимо не просто повышение, а кардинальное увеличение эффективности использования энергоресурсов на всех стадиях: производства, передачи и их потребления. Система теплоснабжения является важной составляющей созданного в последние 60 лет хозяйственного комплекса страны. Этот комплекс не может быть кардинально изменен даже за десятилетие из-за ограниченности ресурсов – финансовых, людских, временных и т. п.

Каждый хозяйственный комплекс характеризуется сложившейся индивидуальной структурой энергобаланса, включающего первичные и вторич-

ные энергоресурсы, побочные потоки энергии¹. Что характеризует хозяйственный комплекс Беларуси? Прежде всего, развитая газовая инфраструктура в широком смысле: газотранспортная система; теплотехнологии, ориентированные на применение природного газа; специалисты, подготовленные для работы с этим топливом. Следует отметить, что только на территории СНГ в вузах есть такая специальность, как промышленная теплоэнергетика, призванная готовить кадры, из числа которых, наиболее вероятно, могут вырасти системные специалисты, которые только и могут обеспечить в конечном итоге требуемое повышение эффективности использования первичных энергоресурсов. Уместно отметить, что эта специальность введена по инициативе выдающегося советского ученого, системного специалиста в области энергетики, академика Л. А. Мелентьева. Игнорировать указанные и материальный, и интеллектуальный ресурсы при определении направления дальнейшего развития энергетического комплекса, в том числе и систем теплоснабжения, недальновидно.

Используемые в Беларуси первичные энергоресурсы составляют $\approx 0,3$ % мирового потребления, в том числе до $\approx 0,5$ % потребления природного газа [5]. Если мы прекратим всякую деятельность, связанную с потреблением топлива, очевиден факт, что значимых изменений ни в экологической ситуации, ни в объемах запасов невозобновляемых энергоресурсов на планете Земля не произойдет. Однако это не означает, что мы не должны бережно относиться как к окружающей среде, так и к потреблению первичных энергоресурсов. Вместе с тем, не представляется разумным «бежать впереди планеты всей», интенсивно развивая технологии энергообеспечения, которые сегодня в сравнении с альтернативными решениями крайне дороги, а потому ведут, по большому счету, только к перерасходу столь необходимых стране средств. По сути, они инвестируются в разработку и производство соответствующих технологий и оборудования в отдельных, далеко не бедных странах.

Более взвешенно следует рассматривать и использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые, конечно, привлекательны, но объективно не способны обеспечить необходимое изменение ситуации. ВИЭ можно и нужно развивать, но не в ущерб (за счет) промышленности и энергетике, отвлекая и без того ограниченные ресурсы от более радикальных шагов по сокращению потребления импортируемого топлива. Пагубно также загружать реальный сектор экономики увеличением тарифов на электроэнергию, компенсируя затраты на покупку электроэнергии у производителей, полученной преобразованием энергии ветра, солнечного излучения, при использовании биогаза и т. п. Желание «попробовать», которым нередко оправдывается то или иное сомнительное техническое решение, может приветствоваться, когда речь идет о собственных инвестициях.

Аналогичный подход в части взвешенности решений справедлив и в отношении экологии. Не следует вводить чрезмерные, неоправданные тре-

¹ Вторичные энергоресурсы – это преобразованные потоки энергии: электро- и тепловая энергия с различными энергоносителями. В этом контексте использован термин «вторичные энергоресурсы». Широко используемое понятие ВЭР не совсем корректно и вносит путаницу. Поэтому в статье, как предписывает соответствующая литература, применяется термин «побочные энергоресурсы».

бования, например по выбросам оксидов азота, затрудняя, а то и блокируя ввод экономически выгодных установок, например на базе газо-поршневых агрегатов, давая дорогу другим – газо- и микротурбинным установкам, менее экономичным и более энергозатратным применительно к используемым на промышленных предприятиях типоразмерам. В результате такой «заботы» об экологии получаем в 1,5 раза больше выбросов диоксида углерода, ответственного за парниковый эффект, борьба с которым приобрела статус первостепенной мировой задачи.

Сегодня предлагается много апробированных решений улучшения ситуации с энергоиспользованием, которые если и несут риск неудачного применения, то минимальный. Энергоресурсы Беларуси ограничены, поэтому надо крайне бережно использовать имеющиеся запасы и то, что дала природа (древесина, бурый уголь, ценное сырье торф, сланцы и т. п.), чтобы оставить их будущим поколениям, у которых появятся разработанные к тому времени дешевые, эффективные и экологически щадящие технологии их использования.

Исходя из сказанного представляется наиболее целесообразным дальнейшие шаги по развитию энергосбережения в Беларуси ориентировать на использование природного газа, разведанных запасов которого, по оценкам РАН и признанных мировых институтов, хватит на 200–250 лет при сохранении нынешнего уровня энергопотребления [6–8]. Неизбежный рост цены природного газа можно компенсировать значительным (до 40 %) повышением эффективности его использования [9]. Кроме того, ввод атомной электростанции на треть снизит потребление газа в электроэнергетике.

Развитие энергообеспечения. Согласно концепции интенсивного энергосбережения, сформулированной профессором А. Д. Ключниковым, почти четверть века возглавлявшим факультет промышленной теплоэнергетики МЭИ, следует, что для достижения максимального энергосберегающего потенциала надо расширять систему, энергосберегающую базу, вовлекаемую в процесс рационализации энергоиспользования [10, 11]. Это ключевой момент, на который следует обратить внимание. Расширение энергосберегающей базы ускорит решение стоящей перед страной глобальной задачи обеспечения относительной энергетической безопасности. К сожалению, следует признать, что абсолютная энергетическая безопасность сегодня недостижима.

Методология энергосбережения. Адрес энергосберегающего потенциала известен – это теплотехнологии, конечная стадия энергоиспользования, ради которой и добываются первичные энергоресурсы и где теоретические затраты на проведение тепловой обработки зачастую не превышают 10 % фактического энергопотребления [10, 11]. Аналогичная ситуация, хотя и несколько лучшая, с теплоснабжением городов и поселков городского типа, где требуемый прорыв в снижении потребления топлива может быть обеспечен в основном за счет расширения энергосберегающей базы. Традиционная методическая основа решения проблемы энергосбережения, отличающаяся дискретностью энергетического анализа в узких границах отдельных технологических агрегатов и в рамках частных мероприятий, оказывается недостаточной для исследований, нацеленных на выявление предельно полного резерва энергосбережения в технологических комплек-

сах материального производства, основное ядро которого, как это ни странно звучит, часто находится преимущественно вне физических границ отдельных конечных приемников энергии – в зонах контакта технологических полупродуктов и продуктов с окружающей средой. Поэтому предпосылкой радикального сдвига в решении проблемы энергосбережения в сфере материального производства является внедрение новой методической основы, базирующейся на системном подходе [10, 11]. Главные особенности этой методологии:

- объектом энергетического анализа служат замкнутые отраслевые технологические комплексы материального производства, которые только и могут формировать базу поиска крупномасштабного энергосберегающего эффекта;

- конкретным средством поиска крупномасштабного энергосберегающего эффекта выступает полная совокупность выявляемых технологических, энергетических, теплотехнических и технических мероприятий интенсивного энергосбережения. При этом в условиях многоступенчатых технологий особое значение приобретают технологические мероприятия.

Потенциальные резервы энергосбережения хотя и велики, однако их наиболее полная реализация возможна только в определенных условиях. Масштабы энергосберегающего эффекта здесь в решающей степени определяются как уровнем системности энергетического анализа, так и содержанием комплекса энергосберегающих мероприятий. Потенциал резерва интенсивного энергосбережения может быть достигнут в общем случае на базе изменения принципиальных основ технологии, техники, управления, повышения качества технологической продукции и полноты ее полезного использования, а также на основе перехода к альтернативным сырьевым материалам, к альтернативной малоэнергоёмкой технологической продукции. Непосредственно предприятия должны активизироваться с тем, чтобы сохранять и развивать рынки сбыта за счет снижения затрат на энергообеспечение. Среди соответствующих работ можно отметить, в том числе, направленные на:

- выявление и разработку энергосберегающих решений существующих теплотехнологий;

- модернизацию технологий и их энергообеспечение. Последнее наиболее просто осуществить на базе как традиционной, так и теплотехнологической когенерации. Если традиционная когенерация расширяет теплофикацию количественно, вовлекая в процесс комбинированной выработки энергопотоков мелких потребителей тепловой энергии, то теплотехнологическая когенерация расширяет теплофикацию качественно, вовлекая потребителей тепловой энергии, требующих идеальные газовые и высокотемпературные органические теплоносители. Теплотехнологическая когенерация, при которой двигатели внутреннего сгорания встраиваются непосредственно в теплотехнологию, более выгодна. Во-первых, потому что используется уже установленное теплоутилизационное оборудование, которым являются технологические установки. Во-вторых, имеет место замещение прямого сжигания природного газа для проведения средне- и низкотемпературных тепловых операций, где оно наименее эффективно с термодинамических позиций. Наконец, в сравнении с традиционной теп-

лофикации эффект усиливается примерно на величину рассеяния энергии с уходящими газами при генерации пара и нагреве сетевой воды, поскольку замещается непосредственно топливо, а не поток тепловой энергии автономного источника. Системная экономия природного газа – от 30 до 45 % ($\approx 1,7$ тыс. т у. т. на 1 МВт электрической мощности когенерационного комплекса) и зависит от квалифицированных проектных решений. Специалистам известно, что энергетически идеальное теплотехнологическое предприятие не может потреблять электроэнергию, произведенную на КЭС, а должно ее генерировать комбинированно, на базе своего теплотехнологического потребления [12]. Главное при этом для предприятий – в существенном снижении финансовой нагрузки на энергообеспечение при сохранении затрат на теплоснабжение и росте их на потребление природного газа. В конечном итоге, имеет место значительное снижение энергетической составляющей себестоимости продукции теплотехнологических производств. При разумной энергетической политике распределенные источники, мощность которых уже сегодня в стране превысила 0,6 ГВт и может превысить 1,0 ГВт, способны существенно облегчить обеспечение графиков электропотребления ОЭС Беларуси. Актуальность последнего обусловлена предстоящим вводом в строй Белорусской АЭС;

- утилизацию сбросных потоков:

– средне- и высокотемпературных. Для потоков тепловой энергии данного температурного уровня возможна внешняя утилизация на покрытие нужд различных теплопотребителей, альтернативой чему может быть конденсационная генерация электроэнергии на этих побочных потоках производства. При этом во всех случаях предпочтительнее внутреннее использование побочных потоков в технологической цепочке, т. е. регенеративное использование, снижающее потребление энергоресурса непосредственно в технологической установке;

– низкотемпературных с помощью абсорбционных тепловых насосов (АБТН), обеспечивающих уже на сегодняшнем уровне не менее 40 % снижения расхода топлива и, главное, финансов на получение сетевой и технологической горячей воды;

• замену электроэнергии механической – тепловыми формами энергии для крупных потребителей. Это и замена электрического привода различными тепловыми двигателями, прежде всего, двигателями внутреннего сгорания. Также замена парокомпрессионных холодильных машин абсорбционными установками при наличии дешевой тепловой энергии когенерационных источников и ей подобных. Ограничением последней замены, кроме всего, является требуемый температурный уровень тепловой обработки, который не должен быть ниже 5 °С. Последнее условие выполняется, прежде всего, в системах промышленного кондиционирования;

• вытеснение редуцирования (дросселирование) потоков адиабатным расширением с выработкой электроэнергии (утилизационные газовые и паровые турбины). При этом целесообразно рассмотреть несколько по-иному использование паровых отопительных котельных с сетевыми паровыми подогревателями, допустимая нагрузка которых может достигать 30 Гкал/ч. Срок службы паровых котлов более длительный, рассеяние энергии одинаково, но за счет установки современных утилизационных

турбогенераторов на базе паровых винтовых машин (ПВМ) можно получать поток электроэнергии, обеспечивающий собственные нужды котельной. Последнее снижает и себестоимость тепловой энергии, и системный расход топлива. ПВМ предназначены для установки в котельных на влажном паре, не требуют качественной химводоочистки и могут работать на начальном давлении до 22 атм [13]. Поскольку все основные расходы собственных нужд и теплотери связаны с отопительной котельной и установка ПВМ на них практически не влияет, удельный расход топлива на выработку киловатт-часа электроэнергии оказывается низким, на уровне 150 г.

Безусловно, для решения стоящих задач требуются квалифицированные кадры, которых в настоящее время остро не хватает. Кроме того, необходимо неформально развивать систему их подготовки. Требуется усовершенствовать систему тендерного отбора исполнителей проектов. Сегодня зачастую отдается предпочтение организациям, которые, в конечном счете, дискредитируют проектные решения, поскольку не имеют ни опыта, ни кадров требуемой квалификации, но берутся выполнить работы при минимальной оплате, рассчитывая привлечь специалистов, часто случайных.

Необходимо обеспечить закупки современного, высокоэффективного оборудования и добиться ответственности специалистов за принятые решения. Формально это имеет место из-за отсутствия квалификации и (или) государственной позиции у заказчиков, поставщики оборудования добиваются решений исходя из своих частных интересов, заручившись зачастую поддержкой институтов, призванных исключить подобное. Яркий пример тому – неоправданно широкое распространение микро- и газотурбинных установок на промышленных предприятиях с игнорированием всех технико-экономических показателей и необходимых расчетов.

Изложенное выше в отношении непосредственно теплотехнологий должно реализовываться и принесет соответствующие изменения, отвечающие требованиям, предъявляемым сегодня к энергосберегающим проектам. Однако этого недостаточно для экономики Беларуси. Поэтому в данном контексте для достижения результата, в котором остро нуждается хозяйственный механизм страны, необходимо расширение энергосберегающей базы с выходом за границы предприятий путем объединения их теплоэнергетических систем с системами теплоснабжения и иными системами энергообеспечения сопряженных населенных пунктов. В результате такого объединения, и это заслуживает внимания, будут иметь место расширение и изменение состава теплогенерирующих источников систем теплоснабжения, что, в конечном итоге, приведет к качественному изменению последних. Такое имело место в 20-е гг. прошлого века в СССР. Тогда был сделан шаг по изменению всей существовавшей системы энергоснабжения: апробирован переход от автономного тепло- и электроснабжения к комбинированному производству соответствующих энергоресурсов. Шаг этот, как известно, в течение десятков лет игнорировался так называемым технически развитым миром из-за политических соображений, а главное, по причине варварски дешевых первичных энергоресурсов, цену которых упомянутый технически развитый мир сам и определял. Лишь спустя почти полвека оппоненты признали разумность перехода к комбинированному производству. Сегодня они по его объемам догнали и многие обошли рес-

публики бывшего СССР. В рассматриваемом случае речь идет об использовании в системе централизованного теплоснабжения побочных энергетических потоков промышленного производства и не только наряду с традиционными теплоисточниками, такими как котельные и ТЭЦ, работа которых основана на потреблении первичных энергоресурсов. К побочным потокам следует отнести, прежде всего, низкотемпературные тепловые потоки, в избытке образующиеся как при реализации промышленных теплотехнологий, так и в жилищно-коммунальном хозяйстве (канализационные стоки). Использование последних в качестве источников теплоты еще в 70-е гг. прошлого века предложил и проводил первые исследования основатель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского политехнического института (ныне БНТУ) профессор Э. Х. Одельский. Сегодня изменились и условия, и техническая база реализации этой идеи, т. е. имеется все необходимое для ее воплощения.

Энергетическая база систем теплоснабжения и ее развитие. Низкотемпературные (до 50 °С) тепловые потоки, которые в той или иной степени организованы, составляют не менее 30 % тепловых выбросов промышленных предприятий. Поскольку все потребление энергии промышленными предприятиями, в конечном счете, рассеивается в окружающей среде в тепловой форме, нетрудно определить величину и отметить значительный потенциал рассматриваемого теплового потока, так как на промышленность приходится до 40 % энергоресурсов, расходуемых в стране. Коммунальному хозяйству требуется приблизительно такое же количество энергоресурсов, как и промышленности, т. е. те же 40 % общего потребления. Расходуемая системами горячего водоснабжения энергия в конечном итоге также рассеивается в окружающей среде с канализационными стоками и, как принято считать, составляет до 30 % энергии, необходимой системам теплоснабжения. Однако низкая температура упомянутых коммунальных и промышленных потоков не позволяет их повторное прямое использование.

Среднетемпературные (до 120 °С) тепловые выбросы промышленных предприятий и в ряде случаев тепловые потоки с более высокой температурой частично или вовсе не используются из-за отсутствия спроса. При этом, как правило, потенциальные потребители, такие как системы теплоснабжения, расположенные по соседству с источниками выбрасываемых тепловых потоков, игнорируются. Между тем объем этих тепловых выбросов, их энергосберегающий потенциал соизмеримы с вышеупомянутыми низкотемпературными побочными тепловыми потоками промышленного производства. Например, Белорусский металлургический завод, по данным энергоаудита, в 2000 г. рассеивал технологические побочные тепловые потоки в воздушных охладителях с температурой и в объеме, достаточных для теплоснабжения г. Жлобин в межотопительный период, т. е. для закрытия потребности горячего водоснабжения города, а это 30 % потребности системы теплоснабжения. И такая величина энергосбережения может быть только увеличена за счет утилизации низкотемпературных потоков либо завода, либо коммунальных на величину до $(100 \% - 30 \%) \cdot 40 \% = 28 \%$ общей потребности теплоснабжения. В итоге можно рассчитывать на снижение потребления топлива на теплоснабжение города порядка 50 %.

Котельные в системе теплоснабжения страны занимают одно из доминирующих мест, многие из них являются производственно-отопительными. Рядом с ними в большинстве случаев имеются промышленные предприятия, на которых те или иные тепловые низкотемпературные потоки производств рассеиваются в окружающей среде градирнями систем оборотного водоснабжения или сбрасываются в канализацию. Связано это с тем, что температура их низка и не позволяет найти потребителей теплоты охлаждения этих потоков. Так, Борисовское СП «ФреБор» ООО, по приблизительным оценкам, сбрасывает в отопительный период через испарительные градирни тепловой поток мощностью до 6 МВт. Технологический, непрерывный сброс теплоты системой оборотного водоснабжения ОАО «Мозырсьоль», в первом приближении, оценивается потоком мощностью до 20 МВт. Завод «Полимир» ОАО «Нафтан» вынужден непрерывно рассеивать через градирни тепловой поток мощностью от 100 МВт в отопительный период и до 200 МВт – в межотопительный. Отделочные производства предприятий легкой промышленности сбрасывают в среднем в сутки не менее 20 ГДж с канализационной водой, использование которой возможно и внутри самих предприятий, несмотря на то что производство ориентировано на паровой теплоноситель. Использование теплоты стоков отделочных производств возможно и внешними потребителями. Во всех случаях, по предварительным оценкам, достигается заметное улучшение финансового положения предприятий. Отметим еще раз, что все перечисленные потоки не используются, поскольку их температура низка.

Сегодня изменилась техническая база, например появились эффективные АБТН, позволяющие изменить ситуацию с утилизацией низкотемпературных тепловых потоков и принести значительную финансовую выгоду. Так, только при изменении энергообеспечения собственной системы теплоснабжения на том же заводе «Полимир» ОАО «Нафтан» за счет установки АБТН, которые будут использовать теплоту систем оборотного водоснабжения, сегодня можно обеспечить ежегодное снижение затрат на собственное теплоснабжение на несколько миллионов долларов. Простой срок окупаемости соответствующего проекта не превышает двух лет. И это не все. Следует обратить внимание, что рядом с предприятием присутствует Новополоцкая ТЭЦ, в зоне теплоснабжения которой находится город. Использование указанного теплового потока, рассеиваемого испарительными градирнями на заводе «Полимир» ОАО «Нафтан», позволит на 40 % снизить затраты тепловой энергии на ТЭЦ, требуемой на теплоснабжение Новополоцка. При нехватке мощности побочного теплового потока завода «Полимир» ОАО «Нафтан» можно рассмотреть использование и подобных потоков непосредственно ОАО «Нафтан», и коммунальных стоков города. Кроме того, соответствующее изменение в работе рассматриваемого теплогенерирующего источника (ТЭЦ) дает дальнейшее развитие системного энергосберегающего эффекта с вводом в строй белорусской АЭС: обеспечивает так необходимое белорусской энергосистеме снижение генерации электроэнергии на ТЭЦ и загружает прочие источники, что важно, без передачи тепловой нагрузки пиковым или иным теплогенерирующим источникам прямого сжигания топлива. И все это достигается не только без перерасхода топлива, но и при обеспечении его экономии. Подобным обра-

зом могут быть связаны большинство предприятий с системами теплоснабжения жилых районов и соответствующими теплогенерирующими источниками. Безусловно, проблем при использовании побочных потоков производства просматривается достаточно, например в связи с неизбежным изменением теплотехнологий с течением времени. Но решения искать необходимо.

Отопительные котельные часто находятся в окружении источников побочных низкотемпературных тепловых потоков. Помимо названных (градирен), это станции очистки сточных вод, температура которых достаточна для утилизации теплоты с помощью АБТН, которые представляются более стабильным источником. Подобная ситуация с расположением систем очистки сточных вод жилого поселка имеет место, например, для котельной ОАО «Управляющая компания холдинга «Забудова». Потребление топлива системой теплоснабжения поселка в этом случае может быть уменьшено за счет утилизации теплоты охлаждения очищаемых потоков, по приблизительным оценкам, на 30 %, поскольку эту величину составляет потребляемая на горячее водоснабжение теплота сетевой воды, рассеиваемая с канализационными стоками.

Другой пример возможного использования стоков связан с Оршанской ТЭЦ, в полукилometре от которой расположена станция очистки сточных вод города. Рядом с очистными сооружениями проходят паропровод и тепловые сети ТЭЦ, т. е. практически готова инфраструктура для обеспечения работы станции АБТН, утилизирующей тепловой поток сточных вод с температурой порядка 30 °С и мощностью, составляющей, по первой оценке, более 20 МВт. Средняя тепловая нагрузка упомянутой ТЭЦ в отопительный период составляет величину, которая близка к 70 МВт, и использование теплоты сточных вод города снизит затраты топлива за год на теплоснабжение на величину $2/7 \approx 30$ %. При этом ТЭЦ и улучшит показатели эффективности, и снизит генерацию электроэнергии до 30 МВт. Последнее, как уже отмечалось, полезно энергосистеме Беларуси с вводом в ее состав АЭС.

Когда речь идет о сопряжении АБТН, утилизирующих побочные потоки, с теплогенерирующими источниками комбинированного производства энергии (ТЭЦ), могут появиться возражения в связи с вытеснением теплофикационной выработки электроэнергии, снижением удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении и увеличением удельного расхода топлива на ТЭЦ. Рассмотрим эти возражения на самом невыгодном для предлагаемого решения примере ТЭЦ высоких начальных параметров: 130 ата, 550 °С. Примем, что в результате внедрения АБТН складывается следующая ситуация: снижение нагрузки на теплофикационный отбор с удельной выработкой (450–550) кВт·ч/Гкал составляет 100 %. При этом исходя из характеристик АБТН возрастает нагрузка промышленного отбора на 60 % от потока теплоты, передаваемой ранее сетевой воде за счет теплофикационного отбора. 40 % теплоты нагрева сетевой воды в этом случае обеспечивается сбрасываемыми побочными потоками. Удельная выработка промышленного отбора данных ТЭЦ составляет 200–250 кВт·ч/Гкал. В результате таких изменений на 60–70 % снижается теплофикационная

выработка на чисто отопительных ТЭЦ при сохранении тепловой нагрузки потребителей. (Для производственно-отопительных ТЭЦ эта величина зависит от соотношения производственной и отопительной нагрузок. Кроме того, можно использовать мероприятия по повышению генерации на потоке пара, требуемого для привода АБТН.) Ухудшаются некоторые традиционные показатели ТЭЦ, но при этом на ней снижается потребление природного газа, а это главный показатель. Безусловно, реальное снижение генерации электроэнергии на ТЭЦ будет меньшим, поскольку низкотемпературных утилизируемых потоков в районе ТЭЦ может быть недостаточно. Требуется дифференцированная оценка в каждом конкретном случае. Интегральное снижение мощности потока генерации электроэнергии на ТЭЦ страны на Т-отборе можно принять до 25 %. В отопительный период, учитывая мощность потока электроэнергии от ТЭЦ 2–4 ГВт, суммарное снижение генерации в результате утилизации побочных потоков теплоты предприятий можно оценить величиной порядка 1 ГВт. В складывающихся в энергосистеме Беларуси условиях это выгодно, поскольку с пуском АЭС и модернизацией паротурбинных ТЭЦ с помощью газотурбинных надстроек, возникает дефицит электрических нагрузок. Дефицит весьма большой, так что его будут испытывать не только паротурбинные конденсационные тепловые электростанции и высокоэффективные парогазовые блоки, но и ТЭЦ. С вводом в строй одного блока избыток генерации оценивается величиной 0,55 ГВт, с вводом АЭС на полную мощность – 1,15 ГВт. Сегодня это вынуждает рассматривать варианты передачи тепловых нагрузок пиковым котлам, внедрения электронагрева, искать иные пути ликвидации указанного дисбаланса. Обозначенное снижение генерации ТЭЦ в результате использования с помощью АБТН тепловых выбросов предприятий обеспечивает требуемое увеличение загрузки АЭС в зимний период, что будет крайне актуально, поскольку облегчит обеспечение графика электропотребления не только без пережога топлива, но и со снижением его расхода.

Энергосберегающий потенциал рассмотренных тепловых побочных потоков можно укрупненно оценить, используя приведенные данные об их относительных весах в структуре энергобалансов предприятий, отраслей и известный объем годового валового потребления в стране энергоресурсов (≈ 40 млн т у. т.). Получаем в топливном эквиваленте объем тепловых выбросов со средней и более высокой температурой – 4,8 млн т у. т. в год, низкотемпературных выбросов – 9,6 млн т у. т. Если принять коэффициент их использования 30 %, то величина энергосберегающего потенциала составит 4,3 млн т у. т. в год, или 10 % существующего валового потребления энергоресурсов. Эта величина сопоставима с тем, что дает паротурбинная теплофикация, и уже только по этой причине заслуживает внимания дальнейшее рассмотрение вовлечения этих энергоресурсов в число теплогенерирующих источников систем централизованного теплоснабжения. Расширение энергосберегающей базы, составляющее основу концепции интенсивного энергосбережения, путем объединения традиционных теплогенерирующих источников с источниками тепловых побочных потоков предприятий промышленности и обеспечения жизнедеятельности (канализация), традиционно рассеиваемых в окружающей среде, является свое-

временным шагом в дальнейшем развитии энергообеспечения страны. Шагом, технически осуществимым, энергетически выгодным и, при должном подходе к реализации, экономически целесообразным.

Безусловно, существуют разной степени технические сложности подключения к существующим системам теплоснабжения, что не позволяет в полной мере реализовать соответствующие мероприятия, вытекающие из изложенного выше. По мнению авторов, главная проблема связана не с техническими трудностями, а с организацией взаимодействия различных субъектов хозяйствования. Над этим следует работать соответствующим специалистам и институтам.

Техническая база. Рассмотрим, на какой технической базе сегодня можно реализовать переход к описанной выше качественно новой системе теплоснабжения и что требуется для его реализации. Если говорить об утилизации среднетемпературных потоков и потоков с более высокой температурой, то вопросы возникают лишь в отношении согласования и взаимовыгодного объединения интересов различных субъектов хозяйствования и предприятий, поскольку необходимое техническое обеспечение, прежде всего теплообменные аппараты, в том числе и успешно работающие на потоках загрязненных, агрессивных и других сред, имеются в достаточном ассортименте. Прежде всего, это теплообменники ТТАИ, выпускаемые ООО «Кедр» в г. Гомеле, широко известные в стране и хорошо себя зарекомендовавшие на протяжении десятилетия [14].

Вопросы могут появиться в отношении использования низкотемпературных тепловых потоков. Техническая проблема их использования решается с помощью АБТН, которые известны давно и внимание к ним привлекалось неоднократно. Еще в прошлом веке на кафедре холодильных машин Ленинградского технологического института холодильной промышленности была доказана возможность теплоснабжения на базе АБТН [15]. Однако низкая стоимость топлива и высокая цена абсорбционной техники в тот период не способствовали развитию этого направления.

Сегодня ситуация изменилась, и в дополнение к изменениям в оценке энергоресурсов появились надежные и удобные в эксплуатации абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы, получившие название чиллеров [16]. Они достаточно дешевые, выпускаются рядом компаний с мировым именем (что косвенно свидетельствует об их популярности и широком применении в развитых странах), например наиболее успешной в мире и широко известной у нас китайской корпорацией BROAD. Период их эксплуатации составляет 20 лет, в ходе которых не нужны расходные материалы. Это, конечно, при условии ответственной эксплуатации, что при наличии квалифицированного персонала и опыта в условиях Беларуси не является проблемой. Дополнительной нагрузки на экологию при использовании чиллеров не создается. Их типоразмерный ряд охватывает диапазон от десятков киловатт до десятков мегаватт мощности отпускаемого теплового потока сетевой воды, нагреваемой до 85 °С, что достаточно для решения обозначенной задачи. Утилизируют чиллеры тепловые потоки в диапазоне температур от 12 до 50 °С. Тепловые потоки с более высокой температурой целесообразно использовать непосредственно. Приводом для чиллеров, и это важно, служит относительно дешевая тепловая энергия.

Возможные теплоносители – пар, дымовые газы, перегретая вода, наконец, жидкое и газообразное топливо. В последнем случае имеется возможность увеличивать мощность отпускаемого потока теплоты от chillеров и выполнять функции водогрейного котла также за счет дополнительного потребления топлива сверх того, что требуется для утилизации имеющегося теплового потока. Соотношение потоков, составляющих баланс энергии chillера, определяется их энергетическим КПД (отопительным коэффициентом, коэффициентом преобразования). Сегодня это соотношение таково: утилизируемый низкотемпературный поток – 40 %, затраты энергии теплогенерирующего источника – 60 %, поток теплоты сетевой воды – 100 %. Соответствующие решения проектировщиков (по схемам использования и подбору параметров теплоносителей) могут обеспечить работу chillера с более высоким коэффициентом преобразования и снизить затраты энергии теплогенерирующего источника с 60 до 45 %, соответственно увеличив вклад утилизируемых потоков и снизив долю потока топлива. В случае широкого использования chillеров соотношение весов утилизируемого теплового потока и затрат теплоты теплогенерирующим источником может быть несколько улучшено за счет заинтересованности изготовителей в изменении характеристик теплопередающих пучков теплообменников. Однако уже сегодня chillеры обеспечивают при сопряжении с котельными до 40 % экономии топлива и соответственно средств на его покупку, что крайне важно. Ведь топливная составляющая себестоимости отпускаемой котельной тепловой энергии высока и может достигать 90 %. Оправдано в этой связи ожидание высоких экономических показателей проектов модернизации. Естественно, необходимо наличие соответствующих побочных тепловых потоков.

Из рассмотрения следует, что проблем, не решаемых в техническом плане, нет. Остается лишь заинтересовать предприятия и организации различных ведомств в переходе к качественно новой системе централизованного теплоснабжения, и этот переход станет достойным ответом на вызов времени.

ВЫВОДЫ

1. Теплотехнологии, базирующиеся на использовании природного газа, являются основной базой энергосбережения в республике. В этой связи целесообразно дальнейшие шаги по развитию энергообеспечения и энергосбережения ориентировать в направлении повышения эффективности использования именно данного топлива с тем, чтобы потребность в импорте природного газа снизилась на десятки процентов.

2. Дальнейшее развитие энергосбережения, ориентированного на реализацию максимального энергосберегающего потенциала, должно базироваться на принципах системного подхода, которые заложены в основу концепции интенсивного энергосбережения.

3. Необходимо рассмотреть вопрос о качественном изменении системы теплоснабжения городов, предусматривающем объединение теплоэнергетических систем промышленных предприятий, энергосистемы и ЖКХ в части использования в системе централизованного теплоснабжения по-

бочных энергетических потоков. Это позволит снизить потребление топлива системами теплоснабжения на 30 %, что приведет к экономии до 10 % потребляемых в стране первичных энергоресурсов, улучшит экологическую обстановку, облегчит покрытие суточных графиков генерации электроэнергии, что актуально с вводом АЭС и в связи с этим обеспечит дальнейшую системную экономию топлива.

4. Для согласования и объединения интересов различных субъектов хозяйствования необходимо создание соответствующей законодательной базы, регулирующей взаимоотношения предприятий промышленности и водопроводно-канализационного хозяйства, с одной стороны, при использовании их тепловых потоков в системах теплоснабжения объектов жилищно-коммунального хозяйства и энергетики – с другой. Техническая база и квалифицированный персонал для реализации предлагаемых изменений в Беларуси имеются. Современные апробированные технологии также доступны, и их внедрение не является проблемой.

5. Изложенное указывает на целесообразность и необходимость внесения в план перспективных национальных проектов, приоритетных на 2016–2030 гг., входящих в разрабатываемый документ «Стратегия. Республика Беларусь-2030: формирование экономики знаний», положения о необходимости развития систем централизованного теплоснабжения за счет использования побочных тепловых потоков промышленных предприятий, станций очистки канализационных стоков на базе абсорбционных тепловых насосов, что, по предварительным оценкам, обеспечит снижение потребления топлива системами централизованного теплоснабжения не менее чем на 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р о р о к о в, Н. «Пределы роста»: мир приближается к коллапсу [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta>. – Дата доступа: 11.09.2014.
2. М е д о у з, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 342 с.
3. Л а в е р о в, Н. П. Топливо-энергетические ресурсы: состояние и рациональное использование / Н. П. Лаверов // Энергетика России: проблемы и перспективы: тр. науч. сессии РАН: общ. собрание РАН 19–21 декабря 2005 г. / под ред. В. Е. Фортова, Ю. Г. Леонова; РАН. – М.: Наука, 2006. – С. 21–29.
4. М и х а л е в и ч, А. А. Энергетическая безопасность Республики Беларусь: компоненты, вызовы, угрозы [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://nmbu.eu/pub/0911/energy_security.pdf. – Дата доступа: 26.03.2010.
5. Р о м а н ю к, В. Н. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 6. – С. 8–12.
6. К о р о т а е в, Ю. П. Природный газ – доминанта современной и будущей энергетики России и мира / Ю. П. Коротаев. – М.: Нефть и газ, 1996. – 83 с.
7. С у д о, М. М. Энергетические ресурсы. Нефть и природный газ. Век уходящий / М. М. Судо, Э. Р. Казанкова // Россия в окружающем мире: аналит. ежегодник. – М.: Междунар. независимый эколого-политолог. ун-т, 1998. – С. 10–22.
8. Г л а в а ВР попросил инвестиций в энергетику на 30 триллионов долларов [Электронный ресурс] / TUT.BY / НОВОСТИ. – 2009. – Режим доступа: <http://news.tut.by/150361.html>. – Дата доступа: 20.10.2009.

9. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / В. Н. Романюк; БНТУ. – Минск, 2010. – 365 с.

10. Ключников, А. Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения / А. Д. Ключников // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С. 12–17.

11. Ключников, А. Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А. Д. Ключников // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 12–16.

12. Шински, Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии / Ф. Шински. – М.: Мир, 1981. – 388 с.

13. Богачева, А. И. Паровинтовая машина ПВМ-1000 обеспечивает электроэнергией центральную котельную в г. Муравленко / А. И. Богачева, М. Н. Никитин, А. Н. Шаповалов // Турбины и дизели. – 2011. – № 3. – С. 48–51.

14. Барон, В. Г. Легенды и мифы современной теплотехники: пластинчатые теплообменные аппараты и кожухотрубные аппараты ТТАИ / В. Г. Барон // Энергоэффективность. – 2007. – № 2. – С. 17–19.

15. Холодильные машины: учеб. для вузов по специальности «Холодильные машины и установки» / Н. Н. Кошкин [и др.]; под общ. ред. И. А. Сакуна. – Л.: Машиностроение, 1985. – 510 с.

16. Абсорбционные тепловые насосы в теплоэнергетических системах промышленных предприятий для снижения энергетических и финансовых затрат / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 2. – С. 32–37.

REFERENCES

1. Prokopy, N. (2014) "Predely Rosta": World Approaches Collapses. Available at: <http://theoryandpractice.ru/posts/9566-predely-rosta> (Accessed 11 September 2014).

2. Medouz, D., & Randers, I. (2007) *Limits of Development. 30 Years Later*. Moscow: Engineering Consulting Center "Academkniga". 342 p. (in Russian).

3. Laverov, N. P. (2006) Fuel-Energy Resources: Condition and Efficient Usage. *Power Engineering of Russia: Problems and Plans of Development: Works of Scientific Symposium of RAN: General Meeting of RAN, 19–21 December 2005*. Moscow, Nauka, 21–29 (in Russian).

4. Mikhalovich, A. A. (2010) *Energy Security of the Republic of Belarus: Components, Provocations, Threat*. Available at: http://nmnby.eu/pub/0911/energy_security.pdf (Accessed 26 March 2010).

5. Romanuk, V. N., Bobich, A. A., & Buby, T. V. (2013) Efficient Use of Energy in Industrial Heat Technologies. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 6, 8–12 (in Russian).

6. Korotayev, Yu. P. (1996) *Natural Gas is a Dominant of Modern and Future Power Industry of Russia and World*. Moscow, Neft' i Gaz. 83 p. (in Russian).

7. Sud, M. M., & Kazankova, E. R. (1998) Power Resources. Petroleum and Natural Gas. Outgoing Century. *Rossia v Okruzhaiushchem Mire: Analit. Ezhegodnik* [Russia in Surrounding World: Analytical Yearbook]. Moscow, International Independent Ecological & Politological University, 10–22 (in Russian).

8. Chief of BP Asked Financial Investments-30 US Dollars Trillion in Power Industry. TUT.BY (2009). Available at: <http://news.tut.by/150361.html> (Accessed 20 October 2009).

9. Romanuk, V. N. (2010) *Intensivnoe Energoberezhnie v Teplotekhnologicheskikh Sistemakh Promyshlennogo Proizvodstva Stroitel'nykh Materialov. diss. dokt. tekhn. nauk* [Efficient Use of Energy in Heat-Technological Systems of Industrial Production of Building Materials. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk. 365 p. (in Russian).

10. Kluchnikov, A. D. (2001) Premises of Radical Increasing of Work Efficiency in Energy Saving. *Promyshlennaiia Energetika* [Industrial Power Engineering], 4, 12–17 (in Russian).

11. Kluchnikov, A. D. (2000) High-Efficiency of Energy: Grounds, Methods, Results. *Teplenergetika* [Heat Power Engineering], 11, 12–16 (in Russian).

12. Shinski, F. (1981) *Processes Control in Energy Economy*. Moscow, Mir. 388 p. (in Russian).

13. B o g a c h e v a, A. I., Nikitin, M. N., & Shapovalov, A. N. (2011) Steam-Propeller Machine MMV-1000 Supplies the Central Boiler in the City Muravlenko with Electric Energy. *Turbiny i Dizeli* [Turbines and Diesels], 3, 48–51 (in Russian).

14. B a r o n, V. G. (2007) Fairy-Tales and Myths of Modern Heat Technology (Plate Heat Exchangers & Shell-and-Tube Heat Exchanger TTAI). *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], 2, 17–19 (in Russian).

15. K o s h k i n, N. N., Sakun, I. A., Bambushek, E. M., Bukharin, N. N., Gerasimov, E. D., П'ин, А. Я., Pekarev, V. I., Stukalenko, A. K., & Timofeevskii, L. S. (1985) *Refrigerating Machines*. Leningrad, Mashinostroenie. 510 p. (in Russian).

16. R o m a n u k, V. N., Bobych, A. A., Muslina, D. B., Kolomytskaia, N. A., Bubyр, T. V., & Mal'kov, S. V. (2013) Absorptive Heat Pumps in Heat Power Systems of Industrial Plants for Energy and Financial Costs Saving. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 2, 32–37 (in Russian).

Представлена кафедрами
ПТЭ и Т, ТГС и В

Поступила 09.09.2014

УДК 536.42:661.426

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАШЕННОЙ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ ГРАДИРНИ И ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЕЕ РАБОТУ В УСЛОВИЯХ ВЕТРА

**Докт. физ.-мат. наук ДОБРЕГО К. В.¹⁾,
асп. ХЕММАСИАН КАШАНИ М. М.²⁾, студ. ЛАСКО Е. Е.¹⁾**

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

E-mail: dobreqo@bntu.by

Современные башенные испарительные градирни могут использовать разнообразные аэродинамические элементы (дефлекторы, ветроперегородки и др.) для улучшения тепловой работы, особенно в условиях ветра. В статье численно исследуется влияние завихрителей в надоросительном пространстве и ветроперегородок на производительность башенной испарительной градирни в условиях ветра. В качестве прототипа взята действующая башенная испарительная градирня ТЭС «Ву-Джин», Китай. При расчетах использовали аналогию тепло- и массопереноса, что позволило рассмотреть аэродинамику однофазного потока и выполнить детальные трехмерные расчеты на современных персональных вычислительных машинах. Коэффициент теплоотдачи оросителя и его гидродинамическое сопротивление устанавливали в соответствии с экспериментальными данными по общему расходу воздуха в градирне. Численная модель протестирована с использованием экспериментальных данных.

Продемонстрирована нелинейная зависимость тепловой производительности башенной испарительной градирни от скорости ветра с минимумом (критическая скорость ветра) при $u_{cr} \sim 8$ м/с для моделируемой системы. Использование крестообразных ветроперегородок существенно не изменяет критическую скорость ветра, но улучшает тепловую работу при умеренном и сильном ветре. Совместное использование ветроперегородок и завихрителей в надоросительном пространстве может повысить эффективность башенной испарительной градирни на величину до 20–30 % при угле установки завихрителей $\alpha = 60^\circ$. Расчеты позволяют анализировать аэродинамические структуры,