

УДК 691.004.18

К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ЗАВОДАХ

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,
доктора техн. наук, профессора КОВАЛЕВ Я. Н., НЕСЕНЧУК А. П.,
канд. техн. наук, доц. РОМАНЮК В. Н.

Белорусский национальный технический университет

К приоритетным задачам хозяйственного комплекса Беларуси относится снижение энергоемкости ВВП, которая в 2,0–2,5 раза выше, чем в промышленно развитых странах. Основными потребителями энергетических ресурсов в стране являются промышленные теплотехнологии и системы теплоснабжения, на нужды которых затрачивается до 75 % общего расхода энергоресурсов. Благодаря мерам, принимаемым в республике, отмечается уменьшение удельных расходов энергии, однако ситуация в отношении энергообеспечения остается напряженной, прежде всего с доминированием природного газа в энергобалансе страны. Потенциал снижения потребления природного газа (ПГ) в промышленном производстве Беларуси за счет повышения эффективности его использования оценивается на уровне 40 %. Затраты на его реализацию велики, но технологические инновации и их внедрение жизненно важны для решения обозначенной выше задачи и последующего сдерживания роста энергопотребления.

Отрасль дорожно-строительных материалов занимает одно из центральных мест в жизни страны, что объясняет необходимость непрерывного ее совершенствования. Географическое положение Беларуси обязывает максимально использовать преимущества транзитных автоперевозок, в том числе трансконтинентальных. Реализация соответствующего потенциала валютных поступлений в бюджет страны связана с развитием и поддержанием на высоком уровне ее дорожной сети, которая оценивается около 20 % всего национального достояния. Ныне это около 50 тыс. км дорог с асфальтобетонным покрытием. Только на поддержание их состояния на должном уровне требуется ежегодно до 10 млн т асфальтобетонной смеси (АБС). Сеть сельских дорог и подъездов, протяженность которых составляет десятки тысяч километров, практически лишена твердого покрытия, и сегодня это сдерживает развитие экономики аграрно-промышленного комплекса. Создание твердых покрытий таких дорог имеет особое значение в свете курса Беларуси на развитие малых городов и поселков в рамках

реализации Госпрограммы возрождения и развития села. Для решения обозначенных задач требуется более полное обеспечение качественными и относительно дешевыми дорожно-строительными материалами, прежде всего АБС.

Объем выпуска горячей АБС, которой в обозримой перспективе нет равнозначной альтернативы, позволяет отнести ее производство к массовому. АБС непосредственно (в процессе получения на асфальтобетонных заводах (АБЗ)) и косвенно (в процессе доставки с завода на место укладки) определяет затраты энергии на создание асфальтобетона. На АБЗ технически передовых стран удельные затраты энергии на 1 т горячей АБС изменяются от 0,27 до 0,38 ГДж. На АБЗ Беларуси они значительно больше: в зависимости от ряда условий, прежде всего влажности исходного сырья, составляют от 0,40 до 0,66 ГДж/т. Снижение потребления энергоресурсов до 0,2 ГДж/т необходимо и возможно в результате системного подхода к выявлению энергосберегающего потенциала и реализации соответствующего комплекса мероприятий, проведение которых можно подразделить на два этапа. Первый объединяет малозатратные мероприятия, предусматривающие в основном подавление рассеяния энергии, второй – мероприятия, требующие значительных инвестиций, связанные большей частью с уменьшением потерь эксергии. Основной энергосберегающий потенциал производства АБС связан с теплотехнологическим потреблением, что очевидно из рассмотрения энергобаланса типового АБЗ и его основного теплотехнологического оборудования (рис. 1).

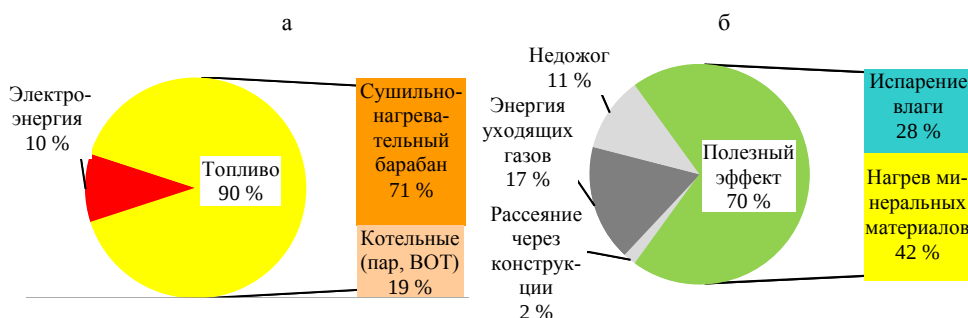


Рис. 1. Структуры: а – потребления типового асфальтобетонного завода; б – расходной части энергобаланса сушильно-нагревательного барабана традиционной схемы потоков энергии и материала

Малозатратные энергосберегающие мероприятия. Снижение энергопотребления при производстве АБС предполагает структурную и параметрическую оптимизацию всего производства АБС и отдельных технологических переделов. Основное потребление энергии связано с тепловой обработкой минеральных материалов в сушильно-нагревательном барабане (СНБ) (рис. 1). Необходимо отметить, что вынос факела горения из внутреннего пространства сушильно-нагревательного барабана и рециркуляция сушильного агента связаны с необходимостью уменьшения рассеяния энергии, имеющего место при традиционной схеме получения сушильного агента в ходе прямого сжигания природного газа [1]. Описанное изменение схемы работы СНБ обеспечивает снижение рассеяния энергии на 16 % за счет устранения механического недожога и снижения рассеяния энергии с уходящим сушильным агентом.

Сегодня подготовка битума связана с использованием малоэффективного теплотехнологического оборудования, часть которого, что важно, применяемая для тепловой обработки битумного вяжущего вне хранилищ, может быть исключена при переносе процессов нагрева битумного вяжущего в смеситель, где его нагрев происходит за счет энергии песчано-щебеночной смеси, в СНБ перегреваемой для этого на ≈ 20 °С. Энергетический КПД СНБ значительно выше, чем аналогичная характеристика теплообменных устройств, используемых для нагрева битума на типовых АБЗ. Это обеспечивает минимизацию рассеяния энергии, связанную с тепловой подготовкой битума.

Затратные энергосберегающие мероприятия. Реализация полного энергосберегающего потенциала производства асфальтобетонной смеси связана со снижением потерь эксергии в процессах тепловой обработки материалов, имеющих место на горячем торце технологических переделов минеральных заполнителей и битума, где термодинамическая эффективность протекающих процессов не превышает 8 %. Одним из решений, обеспечивающих повышение термодинамической эффективности тепловой обработки и за счет этого – качественное снижение удельных расходов энергии на выпуск АБС, является интеграция в теплоэнергетическую систему АБЗ двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что означает создание на базе теплотехнологического потребления производства АБС когенерационных комплексов, т. е. переход к комбинированному производству основной продукции и энергопотоков, прежде всего электроэнергии. Требуемая температура тепловой обработки компонентов АБС не превышает 200 °С. В энергообеспечении подобной низкотемпературной теплотехнологии, с позиций энергетической эффективности, должен использоваться энергоресурс соответствующего температурного потенциала, в противном случае имеют место большие потери эксергии. В комбинированном производстве ДВС, в качестве которых для условий АБЗ наиболее приемлемы газопоршневые агрегаты (ГПА), преобразуют энергию природного газа в потоки энергии: электроэнергию и тепловую энергию с различными теплоносителями, среди которых доминируют выхлопные газы, имеющие наиболее подходящий температурный потенциал для генерации сушильного агента (СА), требуемого для СНБ. При этом тепловая энергия систем охлаждения ГПА в виде потока воды с температурой 95/70 °С может быть использована для тепловой подготовки битума. Апробация подобной комбинации в различных теплотехнологиях успешно прошла в Республике Беларусь на ряде предприятий [1]. Важное преимущество предлагаемой схемы заключается в том, что возможно любое сочетание способов генерации СА: традиционное прямым сжиганием природного газа; когенерационное за счет выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС); смешанное, когда СА получается за счет выхлопных и дымовых газов прямого сжигания топлива. Комбинация расходов выхлопных газов от ДВС и дымовых газов прямого сжигания топлива может быть индивидуальной, в соответствии с требованиями конкретного предприятия. Это обеспечивает надежность протекания основного теплотехнологического процесса, так как в любой момент реализуется возможность перехода от комбинированной генерации СА к традиционной генерации прямого сжигания топлива.

Кроме требуемого качественного снижения удельного энергопотребления рассматриваемое решение обеспечивает значительное улучшение финансового положения предприятия.

Энергетические характеристики рассматриваемого когенерационного производства представлены на рис. 2. Из приведенных данных следует, что наибольший эффект достигается при обеспечении удельной электрической мощности комплекса 94 кВт на 1 т производительности асфальтобетонных заводов. Это означает, что для завода производительностью 50 т/ч асфальтобетонной смеси электрическая мощность составит 4,67 МВт, из которых около 4 МВт отпускается внешнему потребителю. Себестоимость электроэнергии при цене природного газа 175 дол. за 1 тыс. м³ не превышает 40 дол. за 1 МВт·ч. При этом предприятие приближается к энергетически идеальному, когда при наличии собственного теплового потребления нет использования электроэнергии, произведенной отдельным способом [2].

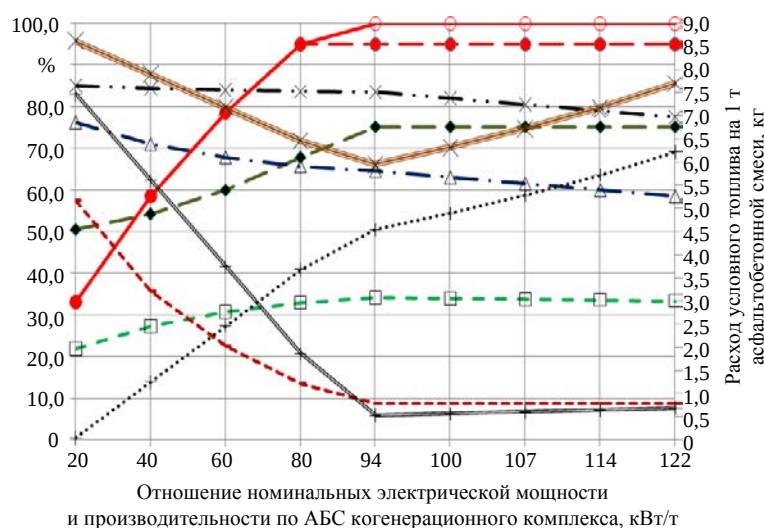


Рис. 2. Влияние электрической мощности когенерационного комплекса, обеспечивающего тепловые нагрузки подготовительного производства АБЗ, на его относительные энергетические характеристики: ◆ — степень термодинамического совершенства генерации СА; □ — термодинамический КПД когенерационного комплекса; △ — энергетический КПД когенерационного комплекса в варианте без использования энергии воды систем охлаждения ДВС; × — энергетический КПД когенерационного комплекса (коэффициент использования топлива); ● — коэффициент теплофикации при сохранении производительности АБЗ; ○ — то же при возможности снижения производительности АБЗ; — — — — процент топлива прямого сжигания в топке СНБ в общем расходе ПГ на когенерационный комплекс; — — — — удельный расход топлива на 1 т АБЗ при расходе топлива на генерацию электроэнергии 318 г/(кВт·ч); × — то же 260 г/(кВт·ч); + — тепловая энергия сетевой воды в 1 кг у. т. на 1 т АБЗ

Сложившиеся компоновки АБЗ позволяют без больших проблем осуществить подобную реструктуризацию их теплоэнергетической системы. При этом исходя из простоты компоновки и прочих факторов наиболее подходят когенерационные модули с единичной электрической мощностью около 2 МВт в контейнерном исполнении. Выбор типоразмера и чис-

ла рассматриваемых модулей для одного СНБ определяется из соображений надежности обеспечения основных технологических процессов тепловой обработки и с учетом необходимости решения ряда сопряженных задач.

Монтаж на месте ГПА в контейнерном исполнении максимально упрощен, поскольку в составе установки имеется все необходимое для автономной работы после присоединения оборудования к инженерным сетям: природного газа, электроэнергии, сетевой воды, выхлопных газов. Количество указанных контейнерных модулей, необходимых для типового АБЗ производительностью 50 т/ч, составляет величину от одной до трех единиц в зависимости от комплекса причин [1].

Специфика АБЗ заключается в том, что при всей значимости и актуальности их продукции имеет место крайне неравномерный режим работы предприятий. Во-первых, АБЗ работают с конца апреля до конца октября, т. е. имеет место сезонный режим в противофазе отопительному сезону. Во-вторых, АБЗ выпускается только в светлое время суток, т. е. в часы наибольшей суточной загрузки энергосистемы. В ночное время АБЗ стоят. Такой график работы, как и суммарное количество заводов в регионе, определяется требованиями укладки асфальтобетонного покрытия и затратами на доставку АБЗ до потребителя. Годовое число часов работы АБЗ находится на уровне 2,0 тыс. [1, 3]. Очевидно, что экономические ограничения, связанные, например, со сроком возврата инвестиций, при существующей ситуации на рынке энергоресурсов не могут быть выполнены в случае такого низкого годового числа часов использования когенерационных комплексов с номинальной мощностью. В этой связи оказывается незаменимым использование контейнерных установок, допускающих их демонтаж, перевозку и установку на новом месте в течение трех рабочих смен. Естественно, что в этом случае инженерные сети обеспечения на новом месте работы должны быть подготовлены заранее.

В контексте изложенных обстоятельств можно предложить следующую схему использования когенерационных контейнерных модулей: в межотопительный сезон ГПА эксплуатируются на АБЗ, в оставшееся время отопительного сезона – на ближайших котельных, например входящей в систему Минэнерго или в будущем той или иной генерирующей компании. Важно и следующее обстоятельство: в обоих случаях когенерационные комплексы выполняют роль пиковых электрогенерирующих мощностей, работая на АБЗ параллельно со штатной системой генерации СА, а в котельной – параллельно с существующими теплогенерирующими установками. Использование для покрытия пиковых электрических нагрузок когенерационных комплексов рассматривается в [4, 5]. В часы ночных провалов электрогенерирующие мощности АБЗ простаивают из-за особенностей основного технологического процесса, а в светлое время суток работают с удельным расходом топлива ниже 150 г/(кВт·ч). Суммарная электрическая мощность генерации на базе теплотехнологического потребления в системе предприятий департамента «Белавтодор» оценивается в 0,3–0,6 ГВт, что имеет значение и для энергетиков [5].

В результате использования когенерационных комплексов на объектах, взаимодополняющих друг друга по сезонам в плане загрузки электрогене-

рирующего оборудования, число часов работы в году таких когенерационных модулей с номинальной мощностью увеличивается до 5–6 тыс., что отвечает существующим экономическим ограничениям по срокам возврата инвестиций. В ряде случаев возможно обеспечить работу основного оборудования АБЗ в течение всего года, организовав на их базе в зимнее время выпуск сухих строительных смесей.

При производстве АБС в объеме около 7 млн т потребление условного топлива составит величину на уровне ≈ 90 тыс. т. В этом случае замещение прямого сжигания топлива комбинированным энергообеспечением с помощью ГПА на базе тепловых нагрузок АБЗ можно определить величиной ≈ 85 %. В объемах годового производства АБС этой величине тепловой энергии соответствует 0,54 млн Гкал, или около 77 тыс. т у. т. У современных ГПА электрический и тепловой КПД практически равны, что позволяет рассчитать годовую выработку электроэнергии на АБЗ когенерационными комплексами на базе ГПА и определить ее величину $6,3 \cdot 10^2$ ГВт·ч. Годовое электропотребление АБЗ, соответствующее выпуску 7 млн т АБС, находится на уровне $0,1 \cdot 10^2$ ГВт·ч (при среднем по предприятиям удельном расходе электроэнергии на выпуск 1 т АБС 15 кВт·ч). Годовой отпуск электроэнергии сторонним потребителям в этом случае составит около $0,5 \cdot 10^2$ ГВт·ч. Качественное изменение ситуации с энергопотреблением на АБЗ при переходе к комбинированному энергообеспечению теплотехнологии подтверждается эксергетическим анализом системы (рис. 3).

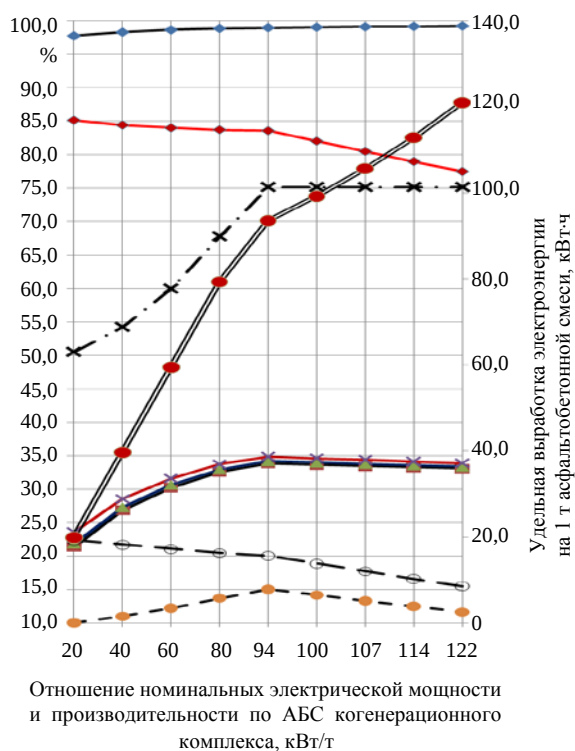


Рис. 3. Влияние электрической мощности когенерационного комплекса, обеспечивающего тепловые нагрузки подготовительного производства АБЗ, на его относительные эксергетические характеристики и удельную выработку электроэнергии: —◆— степень технологического совершенства; —■— степень полного совершенства; —▲— термодинамический КПД; —×— степень термодинамического совершенства; —●— коэффициент использования топлива; —○— термодинамический КПД сушильно-нагревательного барабана (правая ось); —□— термодинамический КПД зоны сушки и нагрева; —×— степень термодинамического совершенства генерации СА; —◆— удельная выработка электроэнергии на 1 т асфальтобетонной смеси

В складывающихся условиях, на наш взгляд, следует рассмотреть целесообразность строительства и эксплуатации указанных когенерационных комплексов АБЗ непосредственно энергетиками, у которых имеются ква-

лифицированные кадры для проектирования, строительства и эксплуатации подобных систем. Вложения в рассматриваемые когенерационные комплексы суммарной электрической мощностью 0,3 ГВт с учетом затрат на создание необходимых систем инженерного обеспечения составят 1,3 дол./Вт, или 0,4 млрд дол., что на 0,2 млрд дол. меньше, чем вложения в альтернативные мощности на базе газотурбинных установок (ГТУ) для выравнивания графиков электропотребления. В то же время требуемые инвестиции для строительства газотурбинных надстроек велики. Существенным фактором является и то, что срок службы ГТУ в пиковом режиме оказывается существенно меньшим. Зависимость эквивалентного числа часов наработки ГТУ является многофакторной и определяется субъективными и объективными обстоятельствами [1, 5]. Значения эквивалентного числа часов наработки ГТУ, свободные от экстремальных обстоятельств, увеличивающих их по отношению к физическим часам работы до двух раз, при общей величине 100–120 тыс. ч срок службы в базовом режиме обеспечивают эксплуатацию ГТУ около семи-восьми лет, в пиковом режиме – четыре-пять лет, что в разы меньше, чем в варианте ГПА [6, 7]. Использование ГТУ в пиковом режиме, когда ежедневно имеет место разгрузка до 50 %, а в худшем случае – остановка и пуск, означает в течение года использование моторесурса до 20 тыс. ч при 6 тыс. ч фактической работы. Моторесурс до капитального ремонта большинства ГТУ составляет 25–48 тыс. ч, т. е. в таком режиме работы через 1,5–2,5 года потребуются капитальный ремонт двигателя. Для ГПА не лимитируются ни изменения нагрузки, ни количество пусков и не связывают с указанными изменениями режима потери моторесурса. При годовой наработке в пиковом режиме 6 тыс. ч и допустимом числе эксплуатации 240 тыс. ч срок службы ГПА доходит до 40 лет. В итоге можно констатировать, что за срок службы ГПА требуемые инвестиции на обновление ГТУ, работающей в пиковом режиме, по факту возрастают, как минимум, в четыре раза. В расчете на год для установок общей мощностью до 0,3 ГВт экономия оценивается величиной $(0,6 \cdot 4 - 0,4) \cdot 10^3 / 40 = 50$ млн дол. Возврат инвестиций в когенерационные комплексы АБЗ только за счет снижения затрат на покупку природного газа (50 млн дол.) и уменьшения суммарных инвестиций, отнесенных к одному году (50 млн дол.), без учета прочих составляющих положительного эффекта обеспечивается за 3,5 года. Отметим, что другие статьи положительного эффекта не менее значимы. Например, ускоренная оборачиваемость инвестиций позволяет уже через 4,5 года те же 0,4 млрд дол. использовать в других целях. Нетрудно видеть, что подобное накопление и использование инвестиций далее возобновляется, и это важный фактор.

Сроки установки контейнерного модуля, создания необходимой инфраструктуры и ввода его в эксплуатацию не превышают одного года. Количество персонала для обслуживания указанных 0,3 ГВт мощностей в двухсменном режиме оценивается величиной менее тысячи человек. Указанные комбинированные генерирующие мощности следует рассматривать не вместо традиционных, существующих, а как дополнение, обладающее большей маневренностью, эффективностью и экономичностью, обеспечи-

вающее более простую эксплуатацию оборудования традиционных тепловых электростанций.

Изменение технологии АБС и использование мобильных АБЗ. Энергозатраты на создание асфальтобетонного дорожного покрытия складываются из нескольких составляющих (рис. 4).

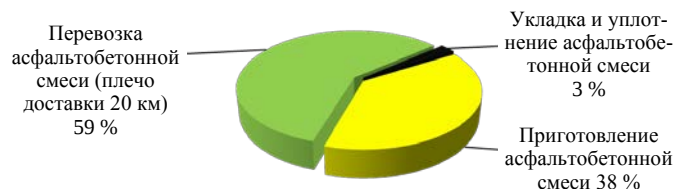


Рис. 4. Структура затрат на создание асфальтобетонного покрытия

Необходимо комплексное снижение энергозатрат, что возможно, например, за счет использования мобильных АБЗ. Последнее предполагает качественное упрощение структуры заводов и технологической цепи получения АБС. В этом контексте предлагается модификация технологии получения АБС, защищенная патентом Республики Беларусь [8]. В ее основе лежит использование битумного вяжущего, модифицированного полиэтиленом высокого давления (ПЭВД), но при этом полиэтилен одновременно является оболочкой капсулы, внутри которой находится битум. В результате такой операции по заключению битума в оболочку из полимера получается дорожный капсулированный битум, позволяющий обеспечить требуемые изменения технологической цепи получения АБС: снижается энергоемкость производства и упрощается состав оборудования АБЗ. При этом возможно повышение морозостойкости и улучшение других свойств битумов за счет соответствующих количественных добавок из полимеров, образующих оболочку капсулы. В результате капсулирования битум превращается в квазидисперсный материал, свойства которого изменяют сложившиеся представления об использовании битума при производстве АБС. Следует еще раз отметить комплексный характер решаемой задачи, поскольку использование капсулирующей оболочки на битумной частице определенного диаметра изменяет не только технологию применения битумного вяжущего, но и свойства асфальтобетона за счет как модифицирующей добавки, так и положительных изменений в режиме тепловой обработки битума, о чем говорилось ранее. Толщина пленки оболочки лежит в пределах 0,050–0,150 мм, объем капсул соответствует цилиндру Архимеда с определяющим размером $\approx 10\text{--}25$ мм. В этом случае выдерживаются требуемые концентрации ПЭВД в смеси с битумом при получении вяжущей композиции, определенные в пределах 3–7 %.

Хранится такой битум на обычных крытых складах, как всякий дисперсный материал, затаренным в мешки или мягкие контейнеры, которые широко используются при перевозке удобрений. Капсулированный битум свободен от слипания при температурах до ≈ 80 °С, что, безусловно, обеспечивается на указанных складах. Капсулы в экспериментах выдерживали нагрузку сжатия с удельным усилием $\sim 1,5$ МПа. Учитывая условия при упаковке в мешки или мягкие контейнеры, обеспечивающие определенное демпфирование динамических нагрузок, поведение битума внутри капсул

под действием указанных нагрузок, а также сыпучесть слоя самих капсул с битумом, материал оболочки выдержит и динамические нагрузки во всем реальном диапазоне их величин. Очевидно, что подобные свойства капсулированного битума позволяют изготавливать и накапливать его в течение всего года, что благотворно для нефтеперегонных заводов, а также снижает остроту вопроса обеспечения АБЗ битумом в течение сезона укладки асфальтобетона.

Перевозка капсулированного битума осуществляется автомобильным или железнодорожным транспортом, при этом не требуется специализированных транспортных средств. Разгрузка битума также не требует тепловой обработки и имеет лишь одно естественное ограничение: не допускать разрушения тары.

В предлагаемом технологическом процессе получения АБС исключается всякая тепловая подготовка битума перед смешением компонентов в смесителе, и в итоге энергозатраты на получение АБС существенно снижаются. В результате применения капсулированного битума снижается энергопотребление на 20 %. Эта цифра сама по себе заслуживает внимания. Однако кроме прямого снижения энергозатрат достигается коренное изменение структуры АБЗ, из которой исключается соответствующее тепловое оборудование, собственно, вся линия подготовки битума в традиционном ее понимании. Энергозатраты на производство 1 т капсулированного битума, требуемые непосредственно для работы капсулятора, оцениваются в 0,1 кг условного топлива на 1 т битума или $\approx 0,006$ кг на 1 т АБС. Очевидно, что они несоизмеримы с потерями энергии в существующей теплотехнологической цепи подготовки битума, что и определяет энергоэффективность предлагаемой технологии.

ВЫВОДЫ

1. Промышленные теплотехнологии в странах СНГ остро нуждаются в снижении энергетической составляющей себестоимости.

2. Требуемое снижение энергоемкости ВВП возможно лишь на пути интенсивного энергосбережения, представляющего собой системный подход на базе термодинамического анализа. При этом требуется модернизация как энергообеспечения теплотехнологических систем, так и непосредственно технологического процесса.

3. Требуемое снижение энергоемкости продукции может быть обеспечено только при совместном устранении неоправданных рассеяния энергии и потерь эксергии. Наличие последних характерно для энергообеспечения теплотехнологических производств СНГ.

4. Следует рассмотреть более детально необходимость соединения интересов промышленных предприятий и энергосистемы, в том числе и в совместной деятельности, направленной на использование потенциала теплотехнологий в генерации дешевой электроэнергии на когенерационных энерготехнологических комплексах.

5. Для успешной реализации предлагаемых решений необходимо дальнейшее рассмотрение вопросов, связанных с разработкой и обеспечением технического, эксплуатационного и управленческого аспектов, что требует

создания единой математической модели, охватывающей комплекс генерирующих мощностей как крупных, входящих в состав Минэнерго, так и мелких распределенных, не входящих в его состав, т. е. модели, которая учитывает все формы энергии и источники их генерации и потребления в едином энергетическом комплексе Республики Беларусь. Для этого требуется юридически-правовое обеспечение для урегулирования взаимодействия предприятий Минэнерго и департамента «Белавтодор», а также предприятий других отраслей, для чего необходимо принятие соответствующего законодательного документа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях / В. Н. Романюк; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2009. – 380 с.
2. Шински, Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии / Ф. Шински. – М.: Мир, 1981. – 388 с.
3. Романюк, В. Н. Основы эффективного энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли: учеб. пособие / В. Н. Романюк, В. Н. Радкевич, Я. Н. Ковалев; под ред. Я. Н. Ковалева. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 291 с.
4. Седнин, В. А. Возможность использования энергетических комплексов промышленных предприятий для покрытия пиковых электрических нагрузок / В. А. Седнин, А. В. Седнин, М. Л. Богданович // Энергия и менеджмент. – 2009. – № 1. – С. 6–10.
5. Квоту обеспечения графиков электрической нагрузки энергосистемы с привлечением потенциала энерготехнологических источников промышленных предприятий / Б. М. Хрусталева [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 1. – С. 18–28.
6. Шмидель, Г.-У. Сервисная поддержка промышленных газовых турбин / Г.-У. Шмидель, А. В. Гущин, В. Е. Торжков // Турбины и дизели. – 2007. – Ноябрь–декабрь. – С. 38–42.
7. Газовая турбина SGTx-3000E. Техническое обслуживание, технический осмотр, основной технический осмотр. Эквивалентные часы эксплуатации. Siemens AG/ Power Generation. – Раздел: 1.2.4. – С.1–6.
8. Спосб получения горячей асфальтобетонной смеси: пат. 12837 Респ. Беларусь / Б. М. Хрусталева, Я. Н. Ковалев, В. Н. Романюк. – Бел. нац. техн. ун-т // Офиц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 1. – С. 87.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 04.08.2010

УДК 536.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. ЕСТЬМАН Р. И., канд. техн. наук ШУБ Л. И.

Белорусский национальный технический университет

В ряде энергетических и неэнергетических технологий в качестве теплоносителей используются жидкости, обладающие энергоаккумулирующими свойствами. К ним относятся: жидкие металлы и сплавы, применяе-