

# Оценка целесообразности использования систем автономного энергообеспечения для предприятий молочной промышленности

**Л.Е. Чухлебов,**

инженер ООО «Остров-Комплект»

Молочная промышленность является отраслью, которая нуждается в трех видах энергии: электрической, тепловой и холодильной. В классическом варианте потребитель, в данном случае предприятие по переработке молока, как правило, извне получает только электрическую энергию.

Тригенерация представляет собой процесс, в котором первичная энергия, содержащаяся в получаемом извне углеводородном энергоносителе (газ, мазут, дизельное топливо и т.п.) одновременно трансформируется в три полезных энергетических эффекта — электроэнергию, тепло и холод [1] самим потребителем. Иначе говоря, тригенерационная установка представляет собой комбинацию из когенерационной установки, производящей тепловую и электрическую энергию из первичного топлива, и холодильной машины (ХМ).

Холодильные машины, входящие в состав тригенерационной установки, могут производить холод, используя либо электрическую энергию (парокомпрессионные ХМ), либо тепловую (абсорбционные ХМ). Насколько может быть

оправдана такая схема применительно к небольшим по мощности предприятиям по переработке молока при производстве холода с использованием парокомпрессионных холодильных машин (ПКХМ)?

Схема энергетического баланса простейшей тригенерационной установки с использованием ПКХМ представлена на рис. 1.

## Расчет потребности в тепловых, электрических и холодильных мощностях

Рассмотрим некое малое предприятие, осуществляющее переработку молока. Для расчета потребности в тепловых, электрических и холодильных мощностях воспользуемся суточным графиком работы оборудования и величинами мощностей для реализации различных техно-

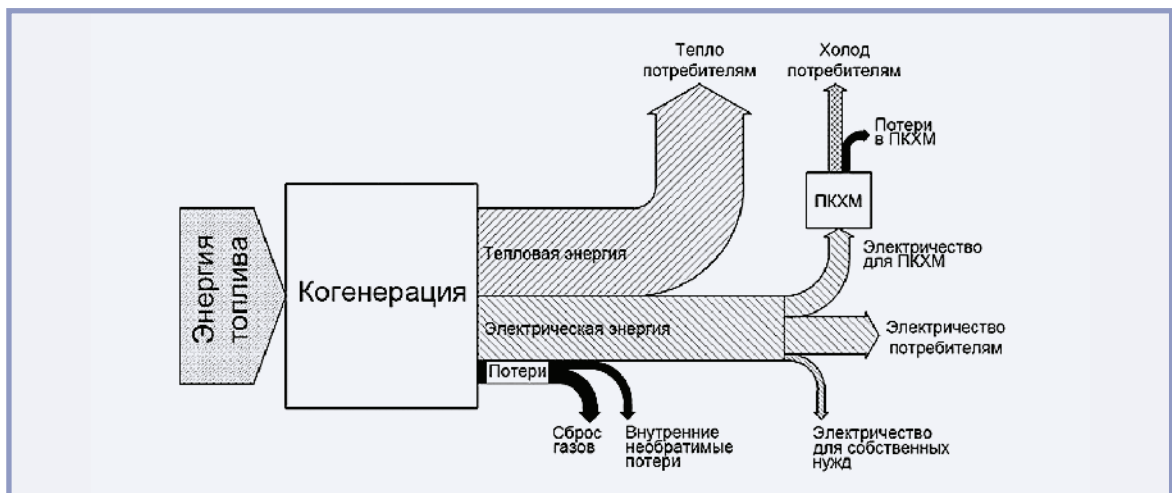


Рис. 1. Энергетический баланс системы тригенерации с использованием ПКХМ.

логических процессов изготовления молочной продукции.

**Поступление сырья для производства продукции:**

- 1) Молоко сырое цельное коровье — 25 000 (кг/сут.);

**Производимая продукция:**

- 1) Молоко цельное пастеризованное: общая выработка 13 000 (кг/сут.);
- 2) Молоко цельное топленое: общая выработка 500 (кг/сут.);
- 3) Кефир: общая выработка 4 000 (кг/сут.);
- 4) Ряженка: общая выработка 1 000 (кг/сут.);
- 5) Простокваша: общая выработка 500 (кг/сут.);
- 6) Йогурт: общая выработка 2 000 (кг/сут.);
- 7) Молоко цельное сырое коровье: общая выработка 4 000 (кг/сут.).

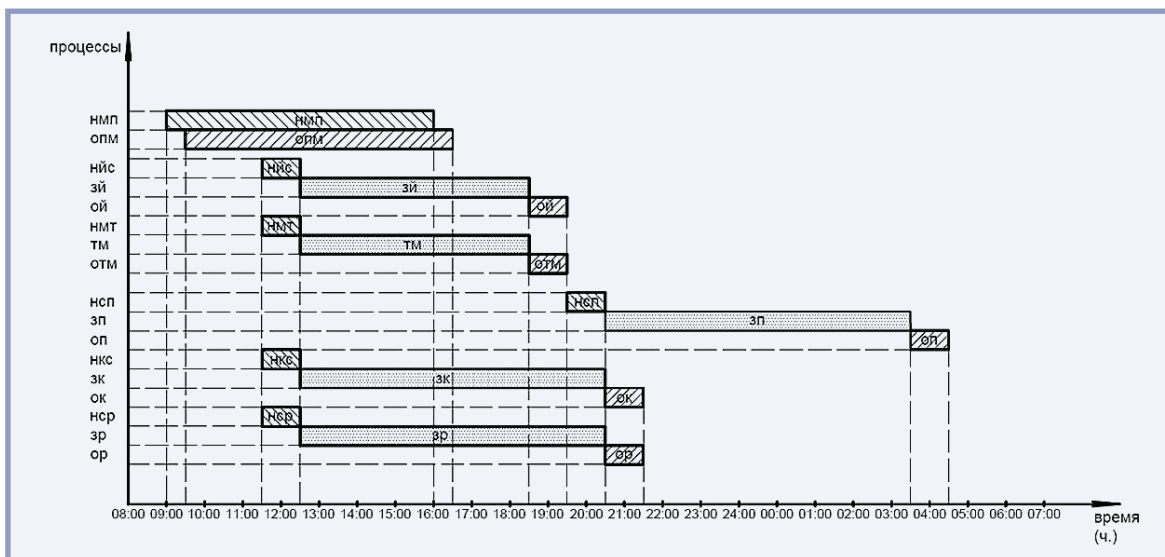
**Технологическое оборудование:**

- 1. Емкость для хранения сырого молока объемом 25 м<sup>3</sup>. Выработка 25 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 2. Емкость для хранения сырого молока 5 м<sup>3</sup>. Выработка 25 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 3. Емкость для хранения сырого молока 5 м<sup>3</sup>. Выработка 25 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 4. Аппарат для пастеризации молока объемом 3 м<sup>3</sup>. Выработка 21 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 5. Емкость для хранения пастеризованного молока объемом 8 м<sup>3</sup>. Выработка 21 (м<sup>3</sup>/сут.);

- 6. Емкость для производства кефира 2 м<sup>3</sup>. Выработка продукции 6,5 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 7. Емкость для производства кефира 2 м<sup>3</sup>. Выработка продукции 6,5 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 8. Емкость для производства простокваши 1 м<sup>3</sup>. Выработка 0,5 (м<sup>3</sup>/сут.); Емкость также используется для производства топленого молока. Выработка 0,5 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 9. Емкость для производства ряженки 1 м<sup>3</sup>. Выработка 1 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 10. Емкость для производства йогурта 1 м<sup>3</sup>. Выработка 1 (м<sup>3</sup>/сут.);
- 11. Емкость для производства йогурта объемом 1 м<sup>3</sup>. Выработка 1 (м<sup>3</sup>/сут.).

Для расчета требуемых мощностей определим максимальные (пиковые) нагрузки оборудования. На рис 2. представлен график работы технологического оборудования в течение суток. Пиковые нагрузки рассчитываются исходя из циклов работы оборудования. Наибольшая сумма мощностей одновременно работающих машин и аппаратов определяет пиковую нагрузку.

Процессы ЗЙ, ЗК, ЗР, ТМ протекают при поддержании постоянной температуры: ее изменение во время этих процессов незначительное вследствие малых потерь тепла в теплоизолированных емкостях. Величинами тепла, необхо-



**Рис. 2.** График работы технологического оборудования в течение суток.

Пояснения к рисунку:

НМП — нагрев молока для пастеризации (589,86 кВт); ОПМ — охлаждение пастеризованного молока (589,86 кВт); НИС — нагрев йогуртовой смеси (43,15 кВт); ЗЙ — сквашивание йогурта; ОЙ — охлаждение йогурта (25,78 кВт); НМТ — нагрев молока для томления (49,89 кВт); ТМ — томление молока; ОТМ — охлаждение томленного молока (49,68 кВт); НСП — нагрев смеси простокваши (16,92 кВт); ЗП — сквашивание простокваши; ОП — охлаждение простокваши (12,46 кВт); НКС — нагрев кефирной смеси (2 × 45,22 кВт); ЗК — сквашивание кефира; ОК — охлаждение кефира (2 × 12,28 кВт); НСР — нагрев смеси ряженки (45,48 кВт); ЗР — сквашивание ряженки; ОР — охлаждение ряженки (38,78 кВт).

димых для периодического подогрева емкостей, можно пренебречь.

**Пиковая нагрузка** по теплу складывается из суммы мощностей процессов НМП, НИС, НМТ, НКС, НСР:

$$Q_{\text{теп}} = Q_{\text{НМП}} + Q_{\text{НИС}} + Q_{\text{НМТ}} + Q_{\text{НКС}} + Q_{\text{НСР}} = 589,86 + 43,15 + 53,89 + 2 \cdot 45,22 + 45,48 \approx 769 \text{ (кВт)}$$

Пиковый нагрузкой по холоду является процесс охлаждения пастеризованного молока (сумма мощностей других процессов охлаждения, протекающих одновременно значительно меньше):

$$Q_{\text{хол}} = Q_{\text{ОПМ}} \approx 590 \text{ (кВт)}$$

Суммарная требуемая электрическая мощность для обеспечения работы холодильного и прочего оборудования предприятия в нашем случае:

$$Q_{\text{эл}} = 549 \text{ (кВт)}$$

Учитывая величины требуемых мощностей и специфику описанного технологического процесса производства, в качестве привода генератора электроэнергии представляется целесообразным рассматривать газопоршневую установку (ГПУ), например, типа ГПУ AVUS 500b,

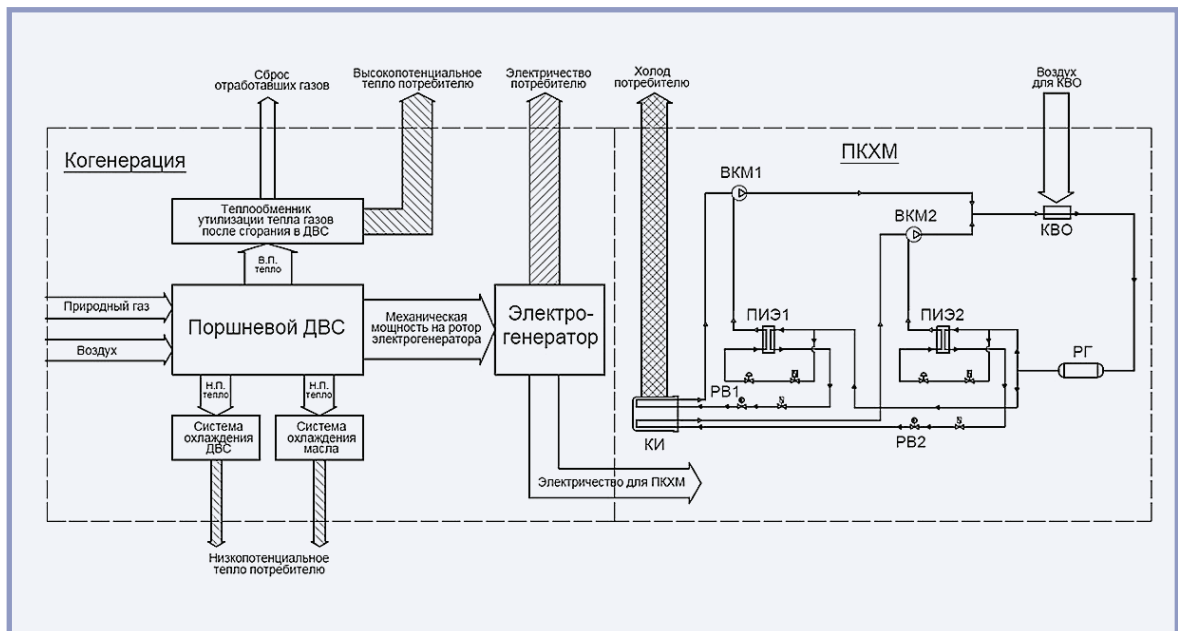
предлагаемую компанией «Хайтед-Энергетика» [2]. Для производства холода будем рассматривать установку охлаждения жидкости CPV-M-2хCSH9553-180(Y)-H на базе ПКХМ, разработанную ООО «Остров-Комплект». Принципиальная схема предлагаемой в этом случае тригенерационной установки представлена на рис. 3.

Стоимость когенерационной установки 2G AVUS 500b с учетом комплекса дополнительных услуг по проектированию, монтажу, проведению тестовых и пусконаладочных работ непосредственно на объекте в соответствии с технико-коммерческим предложением ООО «Хайтед-Энергетика» [2] составляет 62 009 (тыс. руб.): 32 890 (тыс. руб.) — стоимость установки и 21 119 (тыс. руб.) — стоимость комплекса дополнительных услуг.

**Расчет срока окупаемости**

Согласно одноставочному тарифу Мосэнергосбыта на 2018 г., цена 1 (кВт·ч) электроэнергии составляет 5,29 руб., цена 1 м³ природного газа 5,185 руб. Примем эти тарифы неизменными в течение всего периода окупаемости.

**Потребление электроэнергии предприятия, не оборудованного автономной установкой производства тепло- и электроэнергии**



**Рис. 3.** Принципиальная схема тригенерационной установки.

Пояснения к рисунку:

ПКХМ — парокompрессионная холодильная машина; ВКМ1 — винтовой компрессор 1; ВКМ2 — винтовой компрессор 2; КВО — конденсатор воздушного охлаждения; РГ — ресивер горизонтальный; ПИЭ1 — пластинчатый испаритель экономайзера 1; ПИЭ2 — пластинчатый испаритель экономайзера 2; РВ1 — регулирующий вентиль 1; РВ2 — регулирующий вентиль 2; КИ — кожухотрубный испаритель.

Поскольку все оборудование (холодильное, нагревательное, электрическое) предприятия для работы использует электроэнергию, экономическую ценность представляет расчет суточной и годовой потребности предприятия в этом энергоресурсе, выраженном в кВт·ч).

Исходя из суточного графика работы оборудования (рис. 2) общее суточное потребление энергии складывается из трех видов процессов: нагрева, охлаждения и потребления электроэнергии прочим оборудованием.

#### Процессы нагрева:

- 1) Нагрев молока для пастеризации (НМП) — 589,86 кВт в течение 7 ч.;
- 2) Нагрев йогуртовой смеси (НЙС) — 43,15 кВт в течение 1 ч.;
- 3) Нагрев молока для томления (НМТ) — 53,89 кВт в течение 1 ч.;
- 4) Нагрев смеси простокваши (НСП) — 16,92 кВт в течение 1 ч.;
- 5) Нагрев кефирной смеси (НКС) — 45,22 кВт в течение 1 ч (2 емкости для производства);
- 6) Нагрев смеси ряженки (НСР) — 45,48 кВт в течение 1 ч.

Итоговая потребность в тепловой энергии:

$$E_{\text{теп.сут}} = 589,86 \cdot 7 + 43,15 \cdot 1 + 53,89 \cdot 1 + 16,92 \cdot 1 + 45,22 \cdot 1 + 45,48 \cdot 1 = 4\,333,68 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Процессы охлаждения:

- 1) Охлаждение пастеризованного молока (ОПМ) — 589,86 кВт в течение 7 ч.;
- 2) Охлаждение йогурта (ОЙ) — 51,56 кВт в течение 1 ч.;
- 3) Охлаждение томленного молока (ОТМ) — 49,38 кВт в течение 1 ч.;
- 4) Охлаждение простокваши (ОП) — 12,46 кВт в течение 1 ч.;
- 5) Охлаждение кефира (ОК) — 24,56 кВт в течение 1 ч (2 емкости для производства);
- 6) Охлаждение ряженки (ОР) — 32,78 кВт в течение 1 ч.

Итоговая суточная потребность в «холодильной» энергии:

$$E_{\text{хол.сут}} = 589,86 \cdot 7 + 51,56 \cdot 1 + 49,38 \cdot 1 + 12,46 \cdot 1 + 24,56 \cdot 1 + 32,78 \cdot 1 = 4\,299,76 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Электроэнергия для производства необходимого количества тепла

Будем считать, что тепловую энергию предприятие производит с помощью ТЭНов. Как известно, их коэффициент полезного действия варьируется в пределах 0,85–0,95. Условно для расчета примем средний КПД всех ТЭНов предприятия равным 0,9.

#### Количество электроэнергии для производства тепла:

$$E_{\text{эл.теп.сут}} = E_{\text{теп.сут}} / \text{КПД}_{\text{ТЭН}} = 4\,333,68 / 0,9 \approx 4\,815 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Электроэнергия для производства необходимого количества холода

Холодильные мощности предприятие производит с помощью парокомпрессионной холодильной машины (ПКХМ), основными электропотребителями которой являются вентиляторы конденсатора воздушного охлаждения и винтовые компрессоры. Для дальнейшего расчета, условно, примем следующий график работы ПКХМ:

- 7 часов максимальная мощность охлаждения (100%), электропотребление 100% (от максимальной потребляемой электрической мощности ПКХМ) — 328,4 кВт электроэнергии;
- 3 часа мощность охлаждения 50%, электропотребление 60% — 197 кВт электроэнергии;

#### Количество электроэнергии для производства холода:

$$E_{\text{эл.хол.сут}} = 328,4 \cdot 7 + 197 \cdot 3 \approx 2\,890 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Электроэнергия, потребляемая прочим оборудованием

Принимая, что прочее электрооборудование предприятия в сутки будет потреблять 27–28% суммарной электроэнергии для производства холода и для производства тепла:

$$E_{\text{эл.проч.сут}} \approx 2\,080 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Общее суточное потребление электроэнергии предприятием

$$E_{\text{эл.сут}} = E_{\text{эл.теп}} + E_{\text{эл.хол}} + E_{\text{эл.проч}} = 4\,815 + 2\,890 + 2\,080 = 9\,785 \text{ (кВт·ч/сут.)}$$

#### Общее годовое потребление электроэнергии предприятием

$$E_{\text{эл.год}} = E_{\text{эл.сут}} \cdot D = 9\,785 \cdot 365 = 3\,571\,525 \text{ (кВт·ч/год)}, \text{ где } D \text{ — число рабочих дней в году.}$$

#### Потребление топлива предприятием, оснащенного установкой производства тепла и электроэнергии

Потребности предприятия, оборудованного системой когенерации, в тепло-, электро- и холодоснабжении остаются теми же. Отличительной особенностью является сокращение потребления электроэнергии для производства тепловых мощностей за счет полезного использования тепла, производимого когенерационной установкой (утилизации тепла).

Еще одна отличительная особенность – для производства необходимых мощностей установке требуется лишь топливо и воздух. Экономиче-

скую ценность представляется расчет ежедневной и годовой потребности в топливе (природном газе), выраженной в м<sup>3</sup>.

Для дальнейшего расчета условно примем следующий график работы установки:

- 8 часов максимальная мощность (100%), потребления топлива 100% — 157 м<sup>3</sup>/ч природного газа (потребление топлива указано в соответствии с техническими характеристиками установки);
- 16 часов 50% мощность, потребление топлива 50% — 78 м<sup>3</sup>/ч природного газа.

**Общая суточная потребность в природном газе составляет:**

$$V_{п.г.} = 157 \cdot 8 + 78 \cdot 16 = 2\,504 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

**Общая годовая потребность:**

$$V_{п.г.год} = V_{п.г.} \cdot Д = 2\,504 \cdot 365 = 913\,960 \text{ м}^3/\text{год.}$$

**Срок окупаемости когенерационной установки:**

$$(DT_{\text{без уст.}} - DT_{\text{с уст.}}) T_{\text{ок}} = C_{\text{уст}}$$

где  $DT_{\text{без уст.}}$  и  $DT_{\text{с уст.}}$  (руб/год) — годовые денежные траты предприятия, не оснащенного когенерационной установкой ( $DT_{\text{без уст.}}$ ) и оснащенного ( $DT_{\text{с уст.}}$ );  $T_{\text{ок}}$  — срок окупаемости, год;  $C_{\text{уст}}$  — стоимость установки, руб.

$DT_{\text{без уст.}}$  исходя из годовых потребностей в электроэнергии ( $E_{\text{эл.год}}$ ) и ее стоимости ( $C_{\text{эл.}}$ ) составляют:

$DT_{\text{с уст.}}$  рассчитываются исходя из годовых потребностей в топливе ( $V_{п.г.год}$ ) и его стоимости ( $C_{\text{топ.}}$ ):

Стоимость установки ( $C_{\text{уст}}$ ) складывается из ее непосредственной цены ( $C_{\text{уст1}}$ ), стоимости дополнительных услуг и оборудования ( $C_{\text{уст2}}$ ):

$$\begin{aligned} T_{\text{ок}} &= \frac{C_{\text{уст1}} + C_{\text{уст2}}}{E_{\text{эл.год}} \cdot C_{\text{эл.}} - V_{п.г.год} \cdot C_{\text{топ}}} = \\ &= \frac{32\,890\,000 + 29\,119\,000}{18\,893\,367 - 4\,738\,882} = \\ &= 4,38 \approx 4 \text{ года } 5 \text{ месяцев} \end{aligned}$$

### Заключение

**Преимущества использования систем тригенерации:**

- 1) независимость от сбоев поставки и качества электроэнергии;
- 2) собственное производство всех необходимых энергоресурсов;

- 3) очень высокая эффективность использования первичного сырья (топлива);
- 4) существенное сокращение расходов на обеспечение предприятия энергоресурсами (из расчета следует сокращение расходов на 75%);
- 5) обеспечение непрерывности производства, что особенно важно для предприятий пищевой промышленности;
- 6) относительно малый срок окупаемости системы.

**Недостатки использования систем тригенерации:**

- 1) сложное устройство оборудования;
- 2) необходимо содержать штат обслуживающего персонала;
- 3) для работы необходима регулярная поставка топлива либо наличие газовой магистрали.

На основании рассмотрения большого числа публикаций и результатов исследований по тематике можно сделать вывод об исключительной эффективности применения систем автономного энергообеспечения по сравнению с традиционной схемой энергоснабжения. Системы тригенерации показывают особенную эффективность на предприятиях, где существует потребность в холодильной, тепловой и электрической энергии, и позволяют использовать первичное сырье (топливо) с беспрецедентно высоким КПД.

**Полная версия статьи с подробными разъяснениями доступна на сайте <http://refportal.com>**

### Список литературы

1. Морозюк, Л.И. Тригенерация — источник энергосбережения в малой энергетике для аграрного производства / Л.И.Морозюк, С.В. Гайдук, Б.Г. Грудка // Холодильна техніка та технологія. 2015. 51. С. 65–69.
2. «Хайтед-Энергетика» ООО. Коммерческое предложение ГПУ 2G Avus 500b [Документ]. — Москва: «Хайтед-Энергетика», ООО, 2018 г.
3. ПАО «Мосэнергосбыт». Тарифы Мосэнергосбыт 2018 в Москве и Московской области [В Интернете] // <https://mosenergosbyt-lkk.ru>. — ПАО «Мосэнергосбыт», 19 03 2018 г. — 1. — 19 03 2018 г. — <https://mosenergosbyt-lkk.ru/tarify-mosenergosbyt>.