

ТЕПЛООБМЕН



И САМООБМАН В ГОЛОВАХ ЗАВОДЧАН

Температура по шкале лорда Кельвина, широко применяемой для оперирования в науке и технике, где привычный нам «нуль» – это 273 градуса, не отражает эмоциональных людских определений «тепло-холодно». Тем не менее, по укоренившимся во всем человечестве бытовым понятиям, температурные колебания в природе привычно обозначаются двумя арифметическими знаками: + и – по Цельсию. Плюс (нагрев) характеризует подвод тепловой энергии к какому-либо телу либо потоку вещества, а минус – отбор тепловой энергии, повсеместно называемый охлаждением. Именно это представление о потоках является первичным базовым, а все неисчислимое семейство теплообменников – вторично и подчинено основным понятиям в наших головах прямо пропорционально правильности отражения природных закономерностей. Если понимаем верно, то и оборудование подбираем верно.

К примеру, холодильник имеет название только по тому кусочку пространства, что находится внутри его корпуса, а для кухни в целом он – еще один нагревательный прибор помимо батареи центрального отопления. Убедиться в этом легко каждому. Достаточно подойти к своему продуктовому хранителю во время его работы и положить руку на черную трубчатую сеточку-конденсатор, обращенную к одной из стенок кухни. Сеточка будет теплой или горячей, потому что обеспечивает сброс в воздух тепла, отнятого у продуктов. Логически верное усвоение тепловых процессов по векторам «отдать-отобрать» очень сильно облегчает понимание истинной сущности процессов обмена тепла и помогает уберечь работников предприятий от беззастенчивого рекламного манипулирования ими со стороны производителей теплообменной аппаратуры.

По нашему обычаю, присядем перед дорогой к фирмам-поставщикам различных теплообменников и подумаем о том, что же требуется технологическим процессам на молокозаводе.

Цена нагревания и цена охлаждения

Никто не будет отрицать, что предложение различных теплообменников со стороны множества фирм в текущий период времени существенно превышает спрос на них. Притом за минувшие 20 лет перехода к рыночному многообразию (по части выложенного на прилавки) принципиально нового практически нет. Техническая литература былых времен обладает, как известно, иммунитетом к хаотичному взгляду на физические процессы, в связи с чем книги по теплообмену переиздаются строго с той же внутренней технической сутью, что и полвека тому назад. Причина устойчивости проста: человечество научилось уверенно управлять и теплом, и холодом на предприятиях в различных секторах народного хозяйства. Вот только при балансировании качелей «спрос-предложение» на рыночной полянке цена вопроса в каждом направлении стала для нас существенно различной (рис. 1).

Тепло, выделяющееся при сжигании любого топлива, можно так или иначе использовать для получения какого-то количества работы, что осознано наукой и практикой с конца XVII века. На графике (рис. 1) это показано красным сектором справа от вертикальной оси ординат. Но если мы захотим отнять тепло в каком-либо процессе до показателей ниже температуры

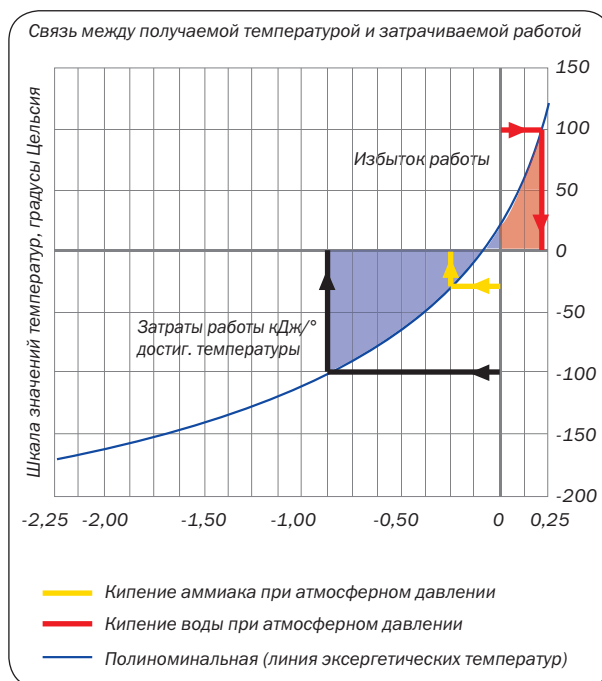


Рис. 1. Различная стоимость получения тепла и его отъема

окружающей среды (синяя область слева от той же оси), то должны будем сюда приложить некоторые усилия – работу. Сопоставим теперь на графике температуру +100 и -100°С и площади сопутствующих им красного и синего секторов. За равенством цифр с противоположными знаками кроется большое неравенство затрат на их достижение! Отсюда понятно, почему избыток работы ценится в 4-6 раз дешевле ее недостатка: его отнять проще, как любой избыток. Потому-то «горячая» килокалория тепла имеет стоимость заметно меньше «холодной». Для понимания такого перекоса возьмем аналогию из собственной жизни. Бензин для своих автомобилей мы покупаем с целью получения движущей силы (за что и платим!), а неиспользуемое при этом тепло в объеме 2/3 теплосодержания из каждого сожженного литра бензина просто выбрасываем в окружающую среду, почти не замечая этого факта и не придавая ему особого внимания. Похожее явление наблюдается при найме рабочей силы по конкретной специальности: избыток предложения этой самой силы ведет к падению размера оплаты труда, а нехватка – к росту размера заработной платы в дефицитном трудовом секторе экономики. Как видим, природные закономерности повсюду имеют похожую логику развития.

Наведем свою глазную оптику на резкость

Если более пристально смотреть в корень любой проблемы, то постепенно осознается: видит ее не глаз – оптический механизм, а мозг, осмысливающий доставленную ему глазом картинку. Поэтому уделим некоторое внимание собственному мозговому устройству, в котором хранятся какие-то остаточные сведения из школьного курса физики, точнее, из раздела теплофизики. Попытаемся востребовать из своей памяти часть знаний для осознанного грамотного выбора любого теплообменника.

Уважаемый читатель, пожалуйста, не вздрагивайте от единственного приводимого в данной статье уравнения теплопередачи $Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$, которое просто необходимо для продуктивной мозговой деятельности в вопросах такого обмена. Его истинный смысл – в отражении не столько количественных, сколько качественных сторон теплообмена, важных при выборе соответствующего оборудования. Это аналогично сообщению: «В завершение обеда всем налили по стакану ... (далее крайне важно уточнить: компота, киселя, молока либо сухого вина или водки)». Сами понимаете, итог для организма может быть различным от качественного содержимого стакана. Суммарное количество тепла в процессе его передачи от одного объекта к другому таким же образом зависит мультипликативно (с резким ускорением) от: а) скорости потоков, материала теплопередающей стенки и количества накипи на ней с двух сторон, что определяется единым коэффициентом теплопередачи k ; б) площади теплообмена F ; в) температурного перепада между теплоагентом и нагреваемой средой по всей длине теплообменной поверхности Δt_{cp} .

Желаєте поднять объем передаваемого тепла? Воздействуйте на любую составляющую путем ее увеличения в общем производстве и получите расчетный положительный результат. Тогда и с поставщиками теплообменного оборудования будете разговаривать на понятном обоим языке. Чаще всего фирмы предлагают развитую поверхность теплообмена F , которую в пластинчатых теплообменниках очень легко наращивать добавлением пластин. Производители же привыкли больше надеяться на большой перепад температур Δt_{cp} за счет подачи в цеха водяного пара из котельной вплоть до $+200^\circ\text{C}$. А с коэффициентом k из того уравнения в ходе переговоров обе высокие договаривающиеся стороны обычно не считаются, игнорируя этот исключительно важный аспект.

Для иллюстрации приводим малое графическое семейство, показывающее разные результаты теплообмена при использовании греющего теплоносителя одинаковой исходной температуры в аппаратах с одной и той же площадью F , но разными направлениями взаимодействующих потоков, влияющих на k и Δt_{cp} , с разной результативностью процесса (рис. 2).

Наиболее рационален теплообмен по схеме 1, далее в порядке убывания эффективности располагаются схемы 2, 3, 4. Иной читатель пожмет плечами: а зачем в это вникать? Да по той причине, что при одинаковой стоимости приобретаемых теплообменников итоги их применения могут существенно отличаться по результативности, если не обращать внимания на компоновку аппарата и направления потоков, взаимодействующих внутри него. Не будем здесь ссылаться на существующий треть столетия пинч-анализ как превосходный аналитический инструмент высокого уровня для понимания энергопроцессов. Все же термодинамический пинч-анализ сам по себе сложноват для понимания, а производителю требуется что-то попроще, нагляднее, ближе к теплообменному оборудованию. Как раз в этом секторе очень ощущается общая слабинка почти всех специалистов молокоперерабатывающей отрасли, которую необходимо осветить далее.

Ее высочество госпожа Рекуперация

До настоящего времени в цехах многих молочных заводов можно увидеть трубчатые пастеризаторы, охладители Митрофанова и другие теплообменники, относящиеся к тому же классу трубчатых, появившихся чуть больше столетия назад. Они примерно в семь раз объемнее пластинчатых аппаратов по занимаемому пространству и во столько же раз затратнее в части расходов тепловой энергии на выработку продукции. Разницу в затратах тепла сложно увидеть,

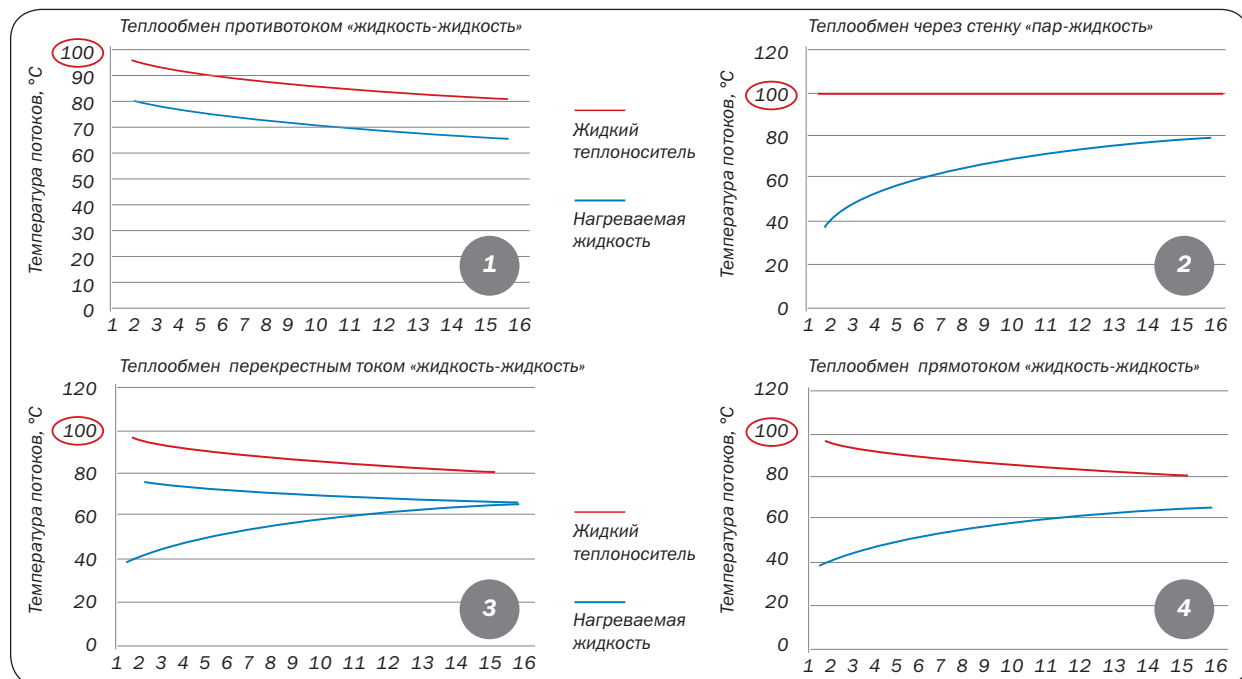


Рис. 2. Характер теплообмена при различной организации процесса

если не понимать разницы между нагревом с рекуперативными (внутренними теплообменными) устройствами утилизации тепла, а также без них.

Как-то со временем отовсюду с поля знаний выветрился тот факт, что Г. А. Кук – основоположник нашей отечественной науки о процессах и аппаратах в молочной промышленности – рассматривал еще 60 лет тому назад трубчатые теплообменники первоначально иной конструкции. В изданном им тогда двухтомнике, ставшем теперь ископаемой редкостью, есть рисунок: в каждой трубе теплообменника по оси размещено еще по одной соосной центральной заглушенной с обеих сторон трубке. Это так называемый вытеснитель, обеспечивающий эффективный тонкослойный прогрев молочного потока, особо подчеркнутый профессором. Но во втором однотомном издании книги в 1973 году (когда автор уже покинул наш мир) такая конструкция не представлена, важный принцип исключен тоже. Вероятно, новые редакторы посчитали иллюстрацию неинформативной, а значит излишней. Тем более что сами трубки без вытеснителей стали меньше диаметром при такой же производительности: формально и примитивно рассуждая – опять же экономия нержавеющей металла... Теперь откройте торцевую крышку любого отечественного трубчатого пастеризатора. Вытеснителей нет, зато слой коричневатого прикипевшего «молочного камня» изнутри трубок обнаружите повсюду. Нарушен ведущий базовый принцип тонкослойного теплообмена с большой скоростью – вот и созерцайте закономерные и многочисленные отрицательные последствия.



Рис. 3. Пластинчатая ПОУ на 5 т/ч с подводом теплохладоносителей

Любая техника имеет собственные плюсы и минусы. Данный случай – не исключение. Хотя принципиальная конструкция пластинчатого теплообменного аппарата оформилась на Руси попутно с воинскими доспехами из пластин еще в конце XIII века (чем мы вправе обоснованно гордиться!), трубчатые теплообменники временно потеснили их столетия спустя. Первоначально они применялись в паросиловой теплоэнергетике конца XIX и всего XX века для очень высоких давлений (до 80 кг/см² вместо обычных трех в «молочке») и температур (до 540°С, тогда как в большинстве процессов переработки молока требуются параметры ниже 100°С). Молочная промышленность, бурно развивавшаяся в начале минувшего столетия, элементарно заимствовала конструкцию трубчатых собратьев из могучей силовой энергетики, чуточку модифицировав, и началось массовое повальное внедрение путем копирования.

Кожухотрубные теплообменники, безусловно, выносливее в ходе жесткой высокотемпературной обработки молока и различных более вязких смесей, они шутя выдерживают любое давление со стороны теплоносителя, их существенно легче раскрывать при необходимости и чистить механически, нежели более нежные пластинчатые. Ну так если хотите «ударить» по молоку температурой – добавьте этот аппарат в разрыв между выходом молока после секции пастеризации и выдерживателем, из которого поток продукта идет на регенерацию тепла! Ваше пожелание будет реализовано наиболее грамотным в инженерном отношении способом с соблюдением заветного балансового принципа «и волки сыты, и овцы целы». При таком решении сам горячий продукт после кожухотрубника с пользой отдает уже ненужное ему пастеризационное тепло потоку, направляющемуся на тепловую обработку, сочетая с этим высокий коэффициент использования теплосодержания – до 75-85%. А если провести инженерный расчет, обнаружится: подводимого извне тепла потребуется в 4-6 раз меньше на осуществление процесса с теми же техническими параметрами. Да и зрительно пластинчатые теплообменники намного компактнее и приятнее глазу, как эта пастеризационная установка (рис. 3).

В мировой практике для достижения экономии тепла давно пускают «по встречке» в рекуператорах также воздушные потоки приточно-вытяжных вентиляционных систем. Но почему-то в России с ее холодным климатом относительно той же Европы рекуператоры специалистами-вентиляционниками не применяются. «Почему-то» вырывается самопроизвольно, как удивление после получения достоверной информации о том, что в бухгалтерской статье затрат на отопление и вентиляцию 2/3 суммарно расходуемых денежных средств ежегодно выдувается вентиляцией из помещений в осенне-зимние месяцы. На отопление с пользой идет только оставшаяся треть расходуемых денег.

Известно ведь, что при коэффициенте рекуперации 0,85 в современных автономных вентиляционных блоках расходы дополнительного тепла на вентиляционные нужды помещений снижаются до 15% от ныне уплачиваемых, то есть почти в семь раз! Думаете, инженеры об этом не знают? Знают, но кто же в России

из работников по найму будет брать на себя дополнительные хлопоты ради внедрения новой системы для постороннего дядя-капиталиста? Тем более что сам странноватый дядя-капиталист никого на такую экономию не нацеливает и рубли в подобное улучшение не инвестирует.

Нюансы различий между развалом рыночным и развалом на производстве

На выставках, этих своеобразных рыночных развалах, доступных для обозрения любому желающему, можно увидеть конструкции теплообменных устройств на любой вкус. Только как определить наиболее экономичные из них не по стоимости «железа», а по тому эффекту, который ожидается каждодневно после приобретения и монтажа на молокозаводе?

Здесь важна позиция лица, полномочного в принятии решений, коего на заграничный манер сейчас именуют агентом принятия решения. Чаще всего это не технический специалист, а один из совладельцев завода.

Состояние агента принятия решения всегда определяет троичная пропорция:

1. Наличие уверенности как следствия обладания достаточно полной информацией о вероятности распределения последствий выбора каждой из альтернатив. То есть что грядет после этого собственного решения?

2. Осознание степени риска как функции вероятности наступления положительных и отрицательных последствий выбора одной из имеющихся альтернатив. Риск в хозяйственной деятельности присутствует всегда, так же как и близкий родственник прибыли. С невысоким риском обычно все мирно сосуществуют десятилетиями.

3. Присутствие неопределенности, то есть сложность или невозможность определения точной вероятности наступления позитивного или негативного события. Червячок неопределенности – самый досаждающий беспокойством внутри организма любого лица, обязанного принимать решения.

Отсюда инновация – это процесс превращения зыбкой неопределенности в контуры риска какой-то приемлемой для собственника величины. Конкретный

субъект становится сторонником инновации, когда ему известна не только степень риска, но и лично подвластен прогноз его собственного состояния в терминах «приобретения-потери», убедительно свидетельствующего о несомненных приобретениях.

Здесь и начинаются завихрения мысленных движений еще до фазы принятия решений. Если в основу собственных представлений кладутся не новые принципы формирования процессов, а только новые формы воплощения явно устаревших технических представлений, то они ведут к последующему производственному развалу в негативном смысле слова вследствие неправильных действий, реализующих те неверные представления.

При рациональном мышлении теплообменники могут быть конструктивно совмещены с технологическим оборудованием, которое в подобных случаях называют аппаратами: в них происходят некие биологические процессы, попутно требующие нагревания и охлаждения с учетом рекуперации. Так, например, с участием автора данной статьи в 2011 г. модернизирован (с автоматизацией температурных операций технологического процесса) творогоизготовитель с прессующей ванной (рис. 4).

В левой части фото ниже середины можно увидеть небольшой пульт автоматического управления. Над ванной (ближе к нам) и за ванной проложены трассы подачи и возврата в терморубашку соответственно ледяной и горячей воды с автоматическими клапанами подачи-отсечки, а в самом низу справа можно заметить открытую горловину пластикового бака для полного сбора самосливом отработанных теплоносителей с автоматическим возвратом их в обратные трассы своих циркуляционных систем. Качество творога при этом высокое и просто не может быть жестким «резинистым». Но если в рубашку аппарата подавать не горячую воду, а пар (как это почти всегда с треском делают заводчане), то ни о какой стабильности качества и автоматизации, дающей экономию тепла, речи быть не может: логика циклов с возвратом теплоносителей в контур будет сильно отличаться от логики нагрева и охлаждения лишь в одну сторону – на сброс. Здесь скрывается принципиальная



Рис. 4. Автоматизированные процессы нагревания-охлаждения в творогоизготовителе с прессующей ванной

разница в мышлении, ведущем к различному качеству готового продукта, который и является главной целью осуществляемого процесса. Теплообмен с автоматическим управлением им – вторичен и должен реализовывать путь достижения главной цели.

Пример очень показателен. При непонимании отмеченных здесь нюансов в разных местах завода тут и там возникают точки его производственного развала. И никакая новая техника со старыми принципами работы, наложенными на наше устаревшее мышление, не в состоянии изменить угасания предприятия в целом.

Где еще прячется экономия при теплообмене

С точки зрения теплообмена расход воды на молокозаводах нередко просто бездарен и бесполезен, как шпингалет из глины. Граждане собственники заводов, для начала посмотрите на кратность потребления воды вашими объектами собственности по отношению к поступающему молоку. Вы обнаружите привычную обкатанную годами цифру: от 4,5 до 8 тонн воды на каждую тонну принятого сырья. Философское «все течет...» кое-где у нас сопровождается удельной цифрой и побольше, хотя в Европе расходуют до смешного мало: от 1,3 до 2,4 тонн, а достижением там считается 0,9 тонны воды на тонну молока. Но вода ведь приходит на завод с температурой +7°С зимой и +12-15°С летом, а утекает в канализацию с температурой до +24-28°С. При наших больших водосбросах это означает, что вне зависимости от вашего желания сэкономить на тепле, как бы самопроизвольно идет неуправляемый подогрев больших объемов воды с уносом воспринятого ею тепла в канализацию в количестве до 0,15 Гкал/т переработанного молока. Это очень много. Переведите-ка отмеченную величину в деньги, принимая во внимание еще подачу объемов воды и стоимость очистки сбрасываемых стоков!

Сформируем за владельцев заводов вполне рациональное желание, ведущее к экономии денег: использовать некоторое количество воды вначале для

охлаждения каких-то потоков в непрерывных процессах, промежуточно направить отепленную воду в термоизолированную емкость (или локальные емкости), а затем израсходовать полученное «дармовое» с водой тепло на первичное ополаскивание автомолцистерн, молочных танков, аппаратов и целых линий, приготовление моющих растворов. Таким образом получаем «два в одном»: существенно экономится расход воды и попутно снижаются теплотраты. Кто же применяет подобную схему? Да почти никто! Рисунок 5 отражает редчайший пример отмеченной экономии на одном из предприятий. Отепленная вода поступает на приемку молока и находится в термоизолированном баке под площадкой с надписью «вода». Можем ведь, если захотим!

А если глубже смотреть в корень теплообмена при нагревании и охлаждении, то надо сводить перепад температур до возможного минимума. Промышленно выгодными признаются перепады от 15°С и меньше между потоком теплоносителя и обрабатываемой субстанцией.

Когда требуется охладить что-то горячее, то делать это лучше ступенчато. Если можно сбить температуру водой в циркуляционном контуре через градирню, то ни в коем случае не следует применять искусственный холод. Не случайно в охлаждающих тоннелях ряда зарубежных фирм вначале существует зона охлаждения горячего упакованного продукта водой, после этого – зона орошения ледяной водой с ее возвратом в холодильную компрессорную, а финальное доведение до температуры хранения и отгрузки – потоком холодного воздуха.

Однако самыми эффективными в части теплообмена потоков «отобрать-передать» в температурном диапазоне от +1 до +40°С являются тепловые насосы. Пример одного из таких теплонасосов (домашнего холодильника) приведен в самом начале данной статьи. Промышленные устройства сложнее, но принцип их тот же: использовать и холодную, и горячую сторону теплообмена в производственных целях.



Рис. 5. Бак повторно используемой отепленной воды для ополаскивания автомолцистерн

Некоторые заповеди второго закона термодинамики

Существует серьезная наука термодинамика, рассматривающая природные явления различного масштаба – от галактик с могучим взаимодействием в них гигантских сил между звездами и планетами до явлений микроэнергообмена внутри каждой клеточки живого организма.

Инженеру, желающему сэкономить энергоресурсы, может быть полезна следующая выжимка из второго закона термодинамики:

1. Надо стремиться, чтобы движущая температурная сила была равномерной (как на рис. 1, график 1). Тогда можно сэкономить не только энергетические ресурсы, но и капитальные затраты.

2. Не следует смешивать потоки с разными температурами или потоки, имеющие разные составы и давления. В противоположность данной рекомендации смешивание повсеместно присутствует на молокозаводах при барботировании пара с треском в разных аппаратах.

3. Увеличение скорости процесса часто приводит к увеличению затрат энергетических ресурсов. Инженерными расчетами выявляются наилучшие скоростные режимы.

4. Желательно использовать источник тепла, имеющий минимальную температуру, достаточную для теплообмена, к примеру, горячую воду +95°С вместо пара.

5. Подбирая потоки для теплообмена, старайтесь объединять такие их взаимодействующие пары, чтобы конечная температура одного из них была близка к начальной температуре другого.

6. Сводите к минимуму дросселирование газов и паров. Порою на заводах котел выдает 10 бар пара, в цехи подают до 5 бар, там еще редуцируют до 3 бар (а кое-где и до 0,6 бар) – никакой эффективности.

7. Не пересекайте температуру окружающей среды внутри любого теплообменника. То есть для подогрева от +20°С и выше требуется один теплообменник (либо отдельная его секция), а для охлаждения от той же температуры – другой теплообменник (секция).

8. Используйте низкотемпературное тепло путем его теплотрансформации посредством тепловых насосов, если отсутствуют потребители низкотемпературного тепла выше параметров окружающей среды. Но прежде надо суметь увидеть потребителей тепла низких температур. Скажем, теплую воду от конденсаторов холодильных установок можно в осенне-зимний период направлять в напольное отопление производственных цехов. Это предложение – не теория, а реально существующий факт на одном молокозаводе в ЮФО.

Пожалуй, здесь и менеджер, занятый минимизацией денежных потерь в различных заводских секторах, сумеет усилить свою аналитику со вскрытием финансовых резервов. Конечно, если он даст себе труд разобраться в том, соблюдаются ли вышеупомянутые заповеди во всех потоках сырья, готовой продукции, инженерном обеспечении производства. Умение

задавать грамотные вопросы себе и членам своей команды всегда в результате оборачивается пользой, если не прятать взгляд от вырисовывающихся истин и решать обнаруженные при этом реальные проблемы. Глядишь, так и экономных японцев догоним к концу текущего столетия...

Заключение

Управление тепловыми процессами на отечественных предприятиях переработки молока, вероятнее всего, подлежит не точечным локальным ударам, а детальному пересмотру. Для этого в мировой практике применяют инженерный аудит и реинжиниринг процессов, используя на договорной основе специалистов сторонних компаний со свежим взглядом на привычные эксплуатационному персоналу устоявшиеся процессы в конкретном производстве.

Россия и тут идет своим кружным путем по бездорожью: а чего тут думать и кого-то приглашать за деньги? Заменим сами кое-где кое-что, подлатаем рассыпавшееся и будем окончательно экономичны, конкурентоспособны и счастливы даже при сохранении прежнего бездорожья!

У автора данной статьи несколько иное понимание вызова времени в конкурентной межстрановой среде, наглядно присутствующей в России: вначале грамотно и детально проанализировать комплекс ситуаций с теплообменом разного рода и теплообменниками на предприятии. И только после экспертного обсуждения результатов расчетов принимать то или иное бизнес-решение, вплоть до временного закрытия завода на полностью современную продуманную реконструкцию. А восторги от посещения выставок и приобретения отдельных единиц оборудования лучше оставить пока что для второго эшелона наступления на технико-технологическую отсталость. Тем более что наша молочная промышленность с ее перемешанными и взболтанными «в одном флаконе» разнотехнологическими технологиями расходует тепла примерно вдвое больше на единицу продукции, чем европейские заводы аналогичной отрасли.

Представители отраслевого бизнеса, с которыми автору периодически приходится контактировать, хорошо понимают изложенное выше рациональное отношение к процессам теплообмена. Но почти все из них поступают строго наоборот (?!), причем не могут затем внятно объяснить логику собственных действий в направлении, противоположном получению ими прибыли. Никакими помехами «сверху» и «сбоку» подобные странности объяснить не получается. Из правдоподобных причин остаются лишь одни сомнения в надлежащем уровне технической компетентности лиц, управляющих подобным мудреным образом своей промышленной собственностью.

Для нормального ведения подобных процессов обычно приглашают грамотных консультантов, оплачивая их квалифицированный интеллектуальный труд.

Новиков В. Б.,
начальник инженерного отдела
Института стратегий развития