

Для обеспечения более эффективного использования энергии, затрачиваемой на работу литьевых машин, необходимо учитывать, что основными ее потребителями, наряду с приводами, являются нагревательная система и собственно технологический процесс (все рисунки: ENGEL Austria GmbH)

# Целенаправленное снижение энергопотребления

**Энергия, расходуемая на приводы, нагрев и технологический процесс.** В настоящее время и дополнительные электростанции не смогут справиться с возрастающим дефицитом энергии. Поэтому было бы намного целесообразнее научиться в перспективе более эффективно ее использовать. С этой точки зрения важной задачей в области литья под давлением деталей из полимерных материалов (ПМ) является правильный выбор наиболее энергоэффективной литьевой машины, учитывая, что каждая из них имеет три системы, потребляющие значительное количество энергии.

**Герхард Диммлер, д-р  
Йозеф Гиссауф,  
Эрих Хохрайтер**

О степени влияния типа выбранной литьевой машины на энергозатраты свидетельствует следующий пример. Предположим, что гидравлическая машина с аккумулятором, имеющая усилие смякания 2800 кН, и электрическая машина с усилием смякания 3800 кН работают с одинаковыми литьевыми формами при массовой дозе впрыска 100 г и времени цикла около 7,5 с. Оказывается, что относительное энергопотребление машины с электромеханическим приводом составляет 0,42 кВт·ч на 1 кг перерабатываемого ПМ, что более чем в два раза

меньше, чем у гидравлической аккумуляторной машины (0,86 кВт·ч/кг).

Причины такого значительного различия в энергопотреблении можно упрощенно объяснить на примере сравнения гидравлического и электрического дозирующих приводных

устройств. Если сопоставить кривые изменения КПД обоих приводов на так называемой топограмме, становится очевидным, что именно в случае гидравлического дозирующего привода его КПД существенно зависит от давления и объема (рис. 1, а),

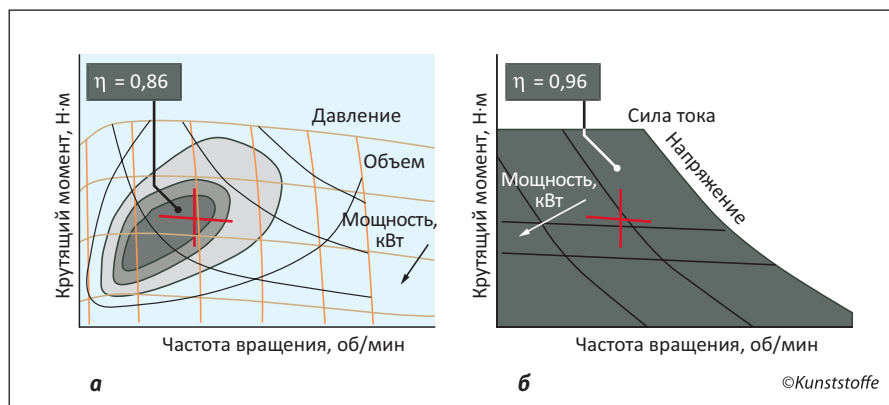
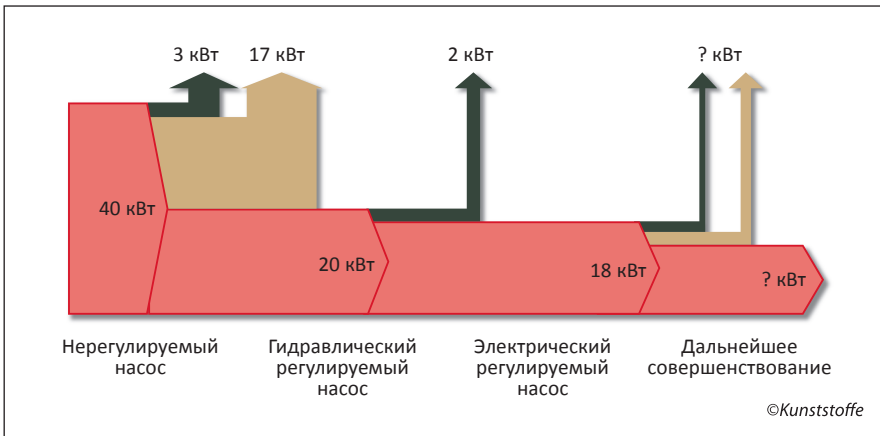


Рис. 1. Характерное технологическое окно у гидравлического дозирующего привода (а) меньше, чем у электрического (б). В случае гидравлического привода КПД ( $\eta$ ) существенно зависит от давления дозирования ПМ и объема, а в случае электрического привода допустимое технологическое окно ограничено силой тока и величиной напряжения, подаваемого на электродвигатель

Dimmler G., Giessauf J., Hochreiter E. Gezielte Verbrauchssenkung // Kunststoffe 101 (2011) 2. S. 40-44.



**Рис. 2.** На типичной средней литейной машине из 40 кВт ее установленной мощности при использовании нерегулируемого насоса (насоса постоянной производительности) 3 кВт этой мощности затрачиваются на потери давления (черная стрелка) и 17 кВт – на потери объема (бежевая стрелка). По мере непрерывного совершенствования гидравлических приводных систем эти потери существенно снижаются

а обусловленное этими факторами оптимальное технологическое окно (закрашено темным цветом) имеет очень ограниченную площадь. Поэтому важное значение приобретает величина давления, с которой работает дозирующий привод (например, 140 или 70 атм). В случае электрического привода допустимое технологическое окно ограничено с одной стороны силой тока, а с другой стороны – величиной электрического напряжения (рис. 1, б). Независимо от того, что КПД электрического привода выше, чем у гидравлического, в первом случае получается значительно более широкая площадь технологического окна. Проще говоря, можно отметить, что для электрического привода гораздо менее важное значение имеют условия, при которых он работает (красный крест на рис. 1, б).

**Сравнительный анализ гидравлического и электрического приводов**

С целью изучения влияния типа привода на потребление энергии были проведены исследования на сопоставимых машинах, оснащенных новыми приводными системами. На обеих установках изготавливалась панель ограждения из АБС-пластика массой 103 г с временем цикла 32 с. В результате измерений было установлено, что электрическая машина с электрическим регулируемым насосом (иначе – насос с электрогидравлическим управлением, сокращенно НЭГУ) потребляет на 20 % мень-

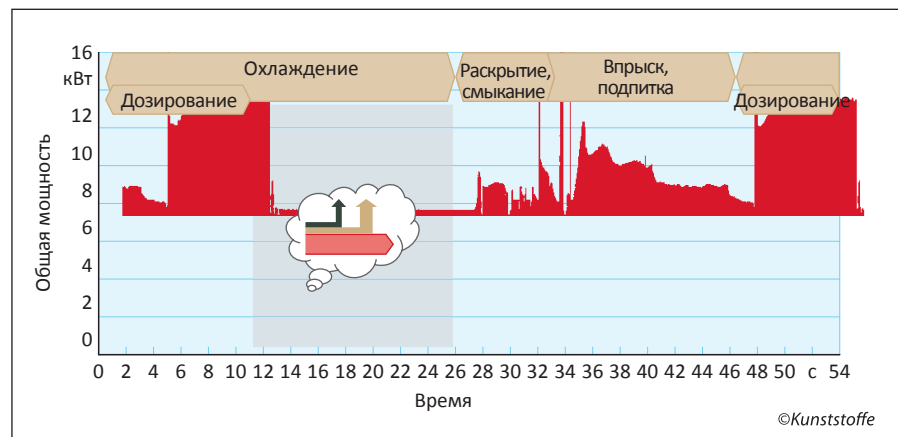
ше энергии, чем машина с гидравлическим регулируемым насосом. Если одинаковые изделия изготавливать на электрической литейной машине, то потребление энергии приводной системой можно снизить более чем в два раза. Основаниями для такой значительной экономии энергии – независимо от типа используемого привода (гидравлического или сервоэлектрического) – являются уменьшение потери мощности в целом, применение узлов с более высоким КПД и уменьшение потерь, связанных с холостым ходом.

Гидравлические приводные системы непрерывно совершенствовались, начиная с простых нерегулируемых насосов вплоть до создания гидравлических и электрических регулируемых насосов (рис. 2). В настоящее время насосы типа НЭГУ уже стали привычными в Европе, но дальнейшее их совершенствование

продолжается. Если проанализировать потребление энергии на протяжении всего цикла литья под давлением, то можно заметить, что на стадии охлаждения, а также по окончании периода дозирования приводная система не потребляет энергию, так как никаких перемещений не происходит (рис. 3). Представляется идеальным отключение гидравлической системы на указанных стадиях процесса.

Серводвигатели, приводящие в действие гидравлические насосы, открывают в этом отношении дополнительные возможности экономии энергии. Они могут менее чем за 100 мс разогнаться из выключенного состояния до максимальной частоты вращения. Независимо от типа насоса – регулируемого или нерегулируемого – подача необходимо для конкретного потребителя количества масла определяется частотой вращения серводвигателя. Благодаря исключению связанных с холостым ходом потерь во время останова можно добиться уменьшения среднего количества подаваемого масла и среднего уровня давления по сравнению с системами, работающими на базе НЭГУ. Приводной нерегулируемый насос – например, насос внутреннего зацепления с очень высоким КПД – и гидравлическая система с оптимальным соотношением  $P/Q$  (здесь  $P$  – потребляемая мощность,  $Q$  – производительность) обладают значительными потенциальными возможностями для снижения потребления энергии.

Системы с регулируемыми насосами и серводвигателями в комбинации с целенаправленно оптимизи-



**Рис. 3.** Анализ энергопотребления на протяжении всего цикла литья под давлением показывает, что на определенных его стадиях (например, на стадии охлаждения отливки) отсутствует необходимость в потреблении энергии

рованными режимами работы проявляют свои преимущества с точки зрения экономии энергии, прежде всего, в периоды транспортировки малых количеств рабочей среды. Независимо от типа используемой гидравлической системы сопоставимые конструкторские исполнения приводов были разработаны уже много лет назад и частично внедрены в практику. Со временем сервоприводы стали более мощными, а их динамические характеристики существенно улучшились. Кроме того, в настоящее время могут быть использованы на практике и новые технические средства для решения задач регулирования, так как уже имеются необходимые вычислительные мощности.

**В обоих случаях можно добиться экономии**

Каким образом эти разработки могут быть использованы предприятиями, работающими в области литья под давлением? Приведенный выше пример из практики показал, что применение новой гидравлической системы позволяет уменьшить потребление энергии примерно на 25 %. При сохранении такой же производительности экономия расходов на энергию по сравнению с системой на основе насоса НЭГУ составляет 1300 евро в год. Таким образом, энергопотребление привода уже вплотную приблизилось к уровню электрической литейной машины. При использовании литейных форм с гидравлическими выталкивателями гидравлическая приводная система с точки зрения потребления энергии может оказаться даже более выгодной, чем у электрической машины, так как в случае гидравлической машины подача необходимого количества масла не требует дополнительных затрат энергии.

В области разработки сервоэлектрических приводных систем также сделан очередной шаг вперед. На современной электрической литейной машине фильтры и дроссели выравнивают колебания напряжения сети (рис. 4). Одновременно они обеспечивают защиту электронных преобразователей частоты переменного тока. Выпрямитель преобразует переменный ток для промежуточного контура в постоянный ток. Этот

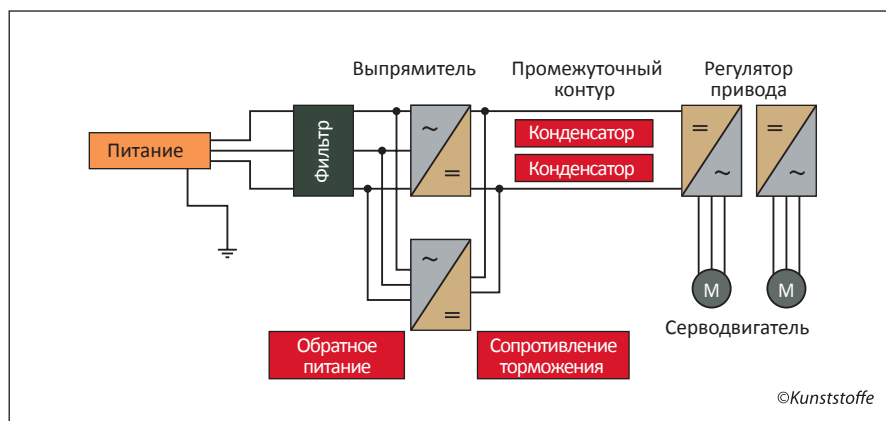


Рис. 4. На электрических литейных машинах питание регуляторов привода осуществляется через промежуточные контуры. Электрический ток из сети питания фильтруется выпрямителем, после чего подается в промежуточный контур

промежуточный контур обеспечивает питание регулятора привода, управляющего электродвигателями. При включении в промежуточный контур конденсаторов можно накапливать энергию торможения на соответствующих стадиях процесса, например при торможении перемещающейся плиты во время открывания литейной формы. Накапливаемая энергия может использоваться для ускорения движения по другой оси.

Современные приводные системы работают с использованием стабилизированного промежуточного контура, благодаря чему литейная машина становится практически независимой от колебаний напряжения в сети и обеспечивает постоянную мощность в любом регионе (Америка, Европа или Азия), где она эксплуатируется. Повышение напряжения в промежуточном контуре (до 650–600 В) позволяет увеличить мощность привода при неизменной силе тока и сделать его способным развивать предельную мощность. Благодаря стабилизированному промежуточному контуру появляется также возможность не расходовать бессмысленно избыточную энергию торможения, а возвращать ее в электрическую сеть.

Однако в случае малых и средних машин возврат энергии в сеть не является целесообразным. В связи с неидеальным потреблением электроэнергии выпрямителями сервоприводы с электронным регулированием создают в электрической сети обусловленные работой системы токи высших гармоник. Если для компенсации реактив-

ных параметров электрических сетей в цепи используются не дросселированные конденсаторы, то при относительно низкой частоте могут с высокой вероятностью возникать резонансные явления из-за гармонических колебаний в преобразователях частоты переменного тока. При неблагоприятных стечениях условий в сети гармонические колебания могут многократно усиливаться и выходить за допустимые границы.

**Львиная доля энергии расходуется на нагрев**

Совершенствование приводных систем – как гидравлических, так и электрических – сопровождается постоянным уменьшением общего количества потребляемой энергии. Если сопоставить энергию, расходуемую на нагрев перерабатываемого ПМ в материальном цилиндре, с общим потреблением энергии, то можно заметить, что независимо от уровня развития приводных систем затраты энергии на нагрев остаются практически на постоянном уровне (рис. 5).

Зачастую количество потребляемой литейными машинами нагревательной энергии значительно превышает потребление энергии приводными системами (рис. 6). При более внимательном анализе можно заметить наличие практически линейной взаимосвязи между потерями тепловой энергии и температурой нагретой поверхности, одна из возможностей снижения которой заключается в уменьшении температуры цилиндра и перерабатываемого ПМ. Однако такой подход зачастую не представляется реальным по причине

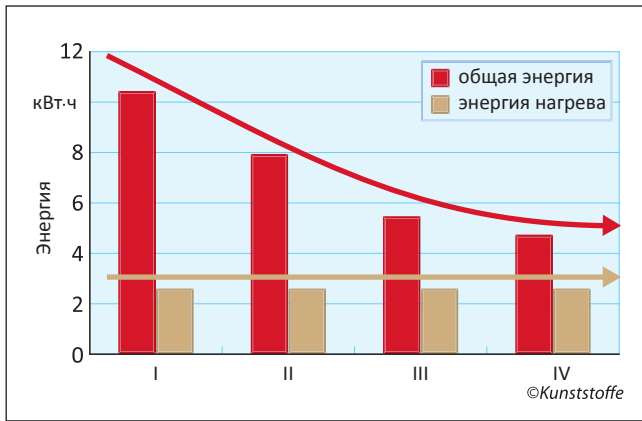


Рис. 5. В то время как количество энергии, потребляемой приводными системами, по мере их совершенствования постоянно снижается, энергия, затрачиваемая на нагрев, остается практически на постоянном уровне: I – гидравлический регулируемый насос; II – электрический регулируемый насос; III – сервогидравлический; IV – полностью электрический

требуемого качества изготавливаемых изделий или в связи с необходимостью повышения давления впрыска менее нагретого расплава ПМ. В качестве альтернативного варианта может рассматриваться улучшение теплоизоляции цилиндра. Благодаря этим относительно простым мерам потребление энергии, как правило, удастся уменьшить по меньшей мере на 20–25 %. Похожей экономии тепловой энергии позволяет добиться применение систем отсасывания воздуха от цилиндра в сочетании с теплоизоляцией, практикуемое при изготовлении медицинского оборудования, а также использование индукционных нагревательных систем, позволяющих уменьшить время нагревания до заданной температуры (рис. 7).

Отправные точки – производительность и время цикла

ска. Кроме того, необходимо стремиться к обеспечению оптимальной загрузки узла пластикации и уменьшению времени цикла, что также способствует экономии энергии.

Каким же образом переработчики за счет оптимизации параметров работы оборудования могут добиться уменьшения времени цикла без негативного влияния на качество вырабатываемой продукции? Важное значение при этом имеют перемещения рабочих органов, связанные со смыканием и размыканием литьевой формы. С целью более внимательного изучения этого фактора на электрической литьевой машине с усилием смыкания 1800 кН были проанализированы данные об изменении потребления энергии при варьировании параметров движения рабочих органов. Следует четко различать разные потребления энергии в течение

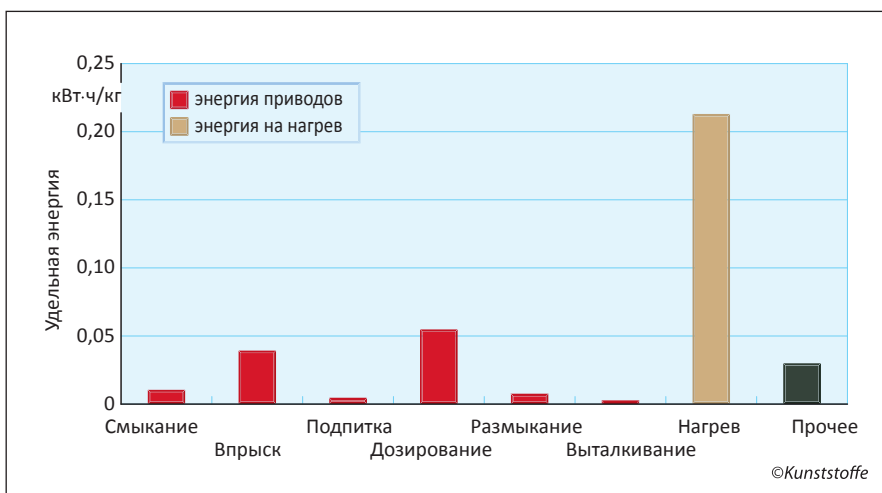


Рис. 6. В процессе литья под давлением львиная доля потребляемой энергии приходится на нагрев

При применении новых технологий может способствовать значительному уменьшению потребления энергии литьевыми машинами. При этом в первую очередь оценивается требуемая производительность оборудования. Следует учитывать, что при прочих равных условиях относительное потребление энергии снижается с увеличением массы впрыска.

При применении новых технологий может способствовать значительному уменьшению потребления энергии литьевыми машинами. При этом в первую очередь оценивается требуемая производительность оборудования. Следует учитывать, что при прочих равных условиях относительное потребление энергии снижается с увеличением массы впрыска. Кроме того, необходимо стремиться к обеспечению оптимальной загрузки узла пластикации и уменьшению времени цикла, что также способствует экономии энергии. Каким же образом переработчики за счет оптимизации параметров работы оборудования могут добиться уменьшения времени цикла без негативного влияния на качество вырабатываемой продукции? Важное значение при этом имеют перемещения рабочих органов, связанные со смыканием и размыканием литьевой формы. С целью более внимательного изучения этого фактора на электрической литьевой машине с усилием смыкания 1800 кН были проанализированы данные об изменении потребления энергии при варьировании параметров движения рабочих органов. Следует четко различать разные потребления энергии в течение цикла (при смыкании и размыкании литьевой формы, а также при извлечении готового изделия) и потребление энергии, зависящее от количества перерабатываемого материала. Если единожды установленные значения скоростей, ускорений и усилий остаются постоянными, то не будет изменяться и определяемое этими факторами потребление энергии даже в тех случаях, когда, например, время охлаждения увеличивается в два раза или осуществляется переход на изготовление изделий с увеличенной толщиной стенок. Потребление энергии дозирующей и нагревательной системами изменяется в зависимости от количества перерабатываемого материала. В первом приближении можно принять, что затраты энергии на впрыск увеличиваются пропорционально массе впрыска. Это подтверждается и результатами экспериментальных исследований.

Исключительно от времени зависит третья составляющая общего потребления энергии, которая включает в себя тепловые потери, затраты энергии на холостой ход и управление машиной. Величина этих энергозатрат в единицу времени остается постоянной. Оптимизация перемещений рабочих органов узла смыкания оказывает положительное влияние на потребление энергии в течение цикла (рис. 8, темные столбцы). Составляющие общего потребления энергии, зависящие от времени работы литьевого оборудования, могут быть уменьшены путем целенаправленной корректировки режима работы машины (см. рис. 8, светлые столбцы).

Однако в общем и целом можно констатировать, что оптимизация перемещений рабочих органов, связанных со смыканием и размыканием литьевой формы, оказывает весьма незначительное влияние на снижение потребления энергии:

- оптимизация пути размыкания – около 1,7 %;
- дополнительное снижение усилия смыкания – около 2,4 %;
- дополнительное уменьшение скорости смыкания – около 4,2 %;
- дополнительное уменьшение скорости размыкания – около 4,9 %.

Именно из этих соображений для специалистов в области литья под давлением важно четко представлять

себе эффективность влияния различных проводимых мероприятий на потребление энергии. При первом

взгляде на датчики потребляемого автомобилем топлива водитель может судить о том, насколько эконо-

мично он в данный момент движется. В соответствии с этой информацией он может изменить свой стиль вождения. По аналогии с датчиками автомобиля следует обеспечить и пользователям литьевых машин возможность постоянного контроля за потреблением энергии. Используя аналитические методы, можно без особых сложностей определить, в какой степени изменение параметров работы оборудования сказывается на потреблении энергии (рис. 9).

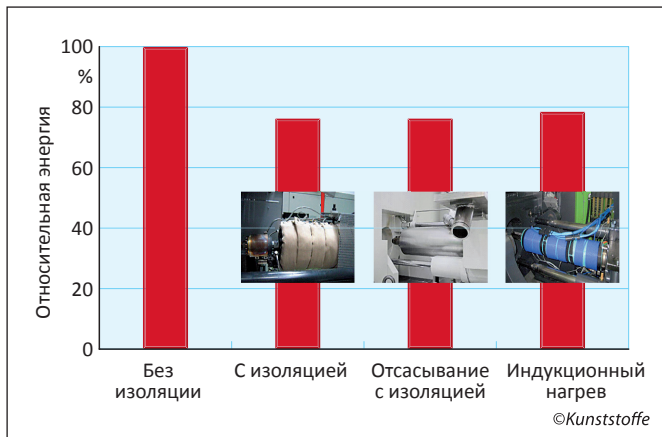


Рис. 7. Благодаря хорошей теплоизоляции цилиндра или использованию альтернативных нагревательных систем потребление энергии может быть уменьшено на 20-25 %

**Экономить можно повсеместно**

В зависимости от особенностей вырабатываемой продукции переработчик подбирает тип и марку литьевой машины, а также соответствующий узел пластикации. После того как оборудование выбрано, в соответствии с описанными выше примерами получается определенное среднее распределение составляющих общего количества потребляемой энергии, из которого около половины приходится на энергию нагрева. Применение современных приводных систем – например, сервогидравлических – позволяет примерно на 25 % уменьшить энергопотребление привода. За счет теплоизоляции цилиндра можно снизить по меньшей мере на 20 % потери энергии на нагрев. Целенаправленная оптимизация технологического процесса способна принести дополнительную экономию порядка 5 % (по отношению к общей энергии, потребляемой на связанные со смыканием и размыканием формы перемещения). Эти данные, конечно же, не являются универсальными; они изменяются в зависимости от конкретных производственных условий. Тем не менее, они позволяют получить общее представление о наиболее важных факторах, с помощью которых можно уменьшить энергопотребление литьевых машин.

*Перевод А. П. Сергеевкова*

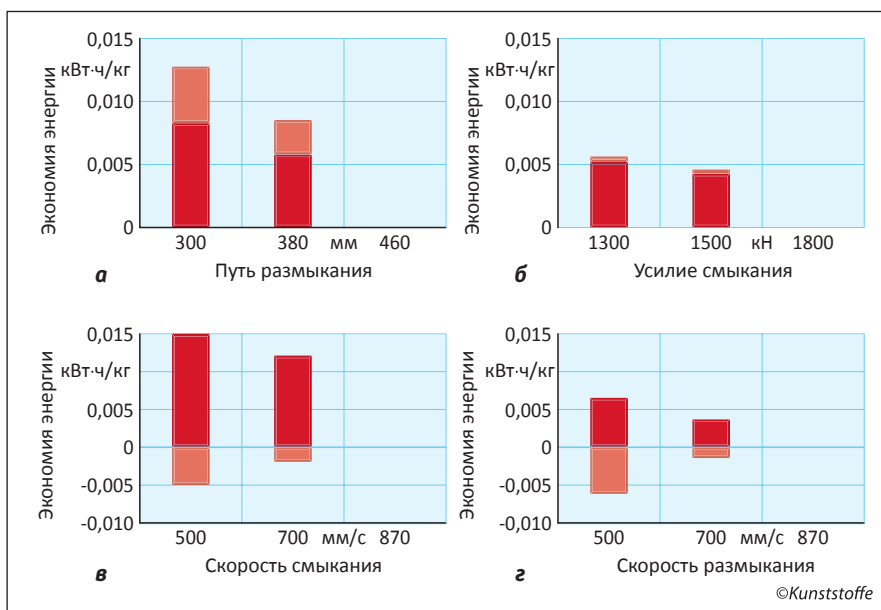


Рис. 8. Потенциальные возможности экономии энергии (в кВт·ч на 1 кг переработанного ПМ), связанные с оптимизацией пути размыкания литьевой формы (а), усилия смыкания (б) и скоростей смыкания (в) и размыкания (г) формы в рамках каждого цикла (см. темные столбцы); количество потребляемой энергии, зависящее от времени работы оборудования, при изменении технологических параметров может даже увеличиваться (см. светлые столбцы)

		Пре- дущий	Текущий	
Смыкание формы	<input type="checkbox"/>	0,0004	0,0005	кВт·ч/кг
Сопло	<input type="checkbox"/>	0,0003	0,0003	кВт·ч/кг
Впрыск	<input type="checkbox"/>	0,0017	0,0016	кВт·ч/кг
Подпитка	<input type="checkbox"/>	0,0011	0,0011	кВт·ч/кг
Охлаждение	<input type="checkbox"/>	0,0004	0,0004	кВт·ч/кг
Дозирование	<input type="checkbox"/>	0,0016	0,0016	кВт·ч/кг
Размыкание формы	<input type="checkbox"/>	0,0001	0,0002	кВт·ч/кг
Выталкивание	<input type="checkbox"/>	0,0006	0,0003	кВт·ч/кг
Извлечение из формы	<input type="checkbox"/>	0,0006	0,0003	кВт·ч/кг
Сухой ход	<input type="checkbox"/>	0,0006	0,0006	кВт·ч/кг

Рис. 9. С помощью приборов наладчик получает информацию о потреблении энергии во время текущего и предыдущего циклов литья под давлением. Благодаря этому он может незамедлительно выявить степень влияния на потребление энергии выполненного изменения технологических параметров

**Targeted reduction in consumption**

**Dimmler G., Giessauf J., Hochreiter E.**

**DRIVE, HEATING AND PROCESSING ENERGY.** Additional power plants alone will not be able to satisfy the ever-growing demand for energy. It is equally, if not more important to use energy more efficiently. Selecting the appropriate injection molding machine represents an essential step in this regard.