

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ФОРМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ И ЛЕДЯНЫМ МОДЕЛЯМ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ



В.С. Дорошенко



К.Х. Бердыев

Текст. рез. на английском языке

Сравнительные расчеты затрат на материалы и электроэнергию при изготовлении песчаной формы по двум литейным процессам: ЛГМ и новой криотехнологии литья по ледяным моделям показывают значительное снижение этих затрат во втором способе литья благодаря невысокой стоимости льда в модельных материалах, состоящих из воды более чем на 90%. Выполнен анализ этих затрат. Литье по ледяным моделям из недорогих материалов дает «проигрыш» по электроэнергии, но «выигрыш» на стоимости материалов и предупреждении ущерба, наносимого окружающей среде.

Владимир Степанович Дорошенко, к.т.н., с.н.с., Бердыев Курбан Ходжа-Оглы, главный конструктор, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАНУ, Украина, г. Киев

Крио-вакуумные технологии изготовления песчаных литейных форм являются одним из направлений инновационного процесса в литейном производстве. Они улучшают экологическую обстановку и соответствуют высоким нормам ресурсосбережения за счет многократного использования формовочных материалов, минимального применения связующих.

По степени ущерба, наносимого окружающей среде, литейно-металлургический комплекс занимает второе место среди отраслей промышленности после топливно-энергетического комплекса. Ухудшение качества окружающей среды ведёт к заболеванию населения. По мнению медиков, более половины всех болезней вызывается вредным воздействием химических, физических и биологических факторов среды. Нет сомнений, что охрана окружающей среды является важным фактором развития литейного производства главным образом путём предупреждения нарушения экологического равновесия рациональным природопользованием. При этом решающая роль отводится малоотходным и безотходным технологиям, обеспечивающим охрану природы на более высоком качественном уровне. «Устойчивое развитие - это гармоничное экономическое развитие, удовлетворяющее принципам социальной справедливости и экологической ответственности» (формулировка ООН).

Модернизация литейного производства должна быть направлена как на решение экономических проблем, так и на создание комфортных усло-



а)



б)



в)

Рис. 1. Ледяные модели: а) оснастка и ледяная модель, б) и в) - песчаные оболочковые формы по ледяным моделям, распиленные для контроля параметров

вий для существования и деятельности человека. Это является серьёзной проблемой. В действующих литейных цехах при производстве 1 т отливок из чугуна и стали выделяется около 50 кг пыли, 250 кг окиси углерода, 1,5...2,0 кг окиси серы, 1 кг окиси углеводородов и образуется до 5 т твёрдых песчаных отходов. Поэтому модернизация формовочных и стержневых участков должна включать внедрение малотоксичных и нетоксичных составов смесей [1]. Особенно экологически небезопасны процессы с использованием синтетических смол (преобладают в результате экспансии зарубежных фирм в большинстве крупных литейных цехов) и других органических связующих, которые дают до 70% загрязнений природной среды от литейных цехов [1]. При нагреве форм и стержней в интервале 400 – 800°C наблюдается интенсивное выделение фенола, бензола, толуола, крезола, формальдегида, аммиака и других газов. Будущее - за связующими неорганического происхождения для формовочных смесей.

Предметом рассмотрения в этой статье являются способы литья по разовым моделям, относящиеся к точным видам литья (near net shape / precision casting), производство которого в мире с каждым годом возрастает, поскольку эти способы способствуют уменьшению металлоемкости отливок и повышению их точности. Разновидности рассматриваемых технологий связаны с вакуумированием формы из песка без связующего, такой

вид формовки также все шире применяется в литейных цехах. Например, вакуумно-пеночная формовка (ВПФ), служащая чуть ли не образцом экологичности среди литейных процессов, за рубежом за последние годы перешла из разряда спецвидов литья в основные способы производства отливок в разовые песчаные формы [1].

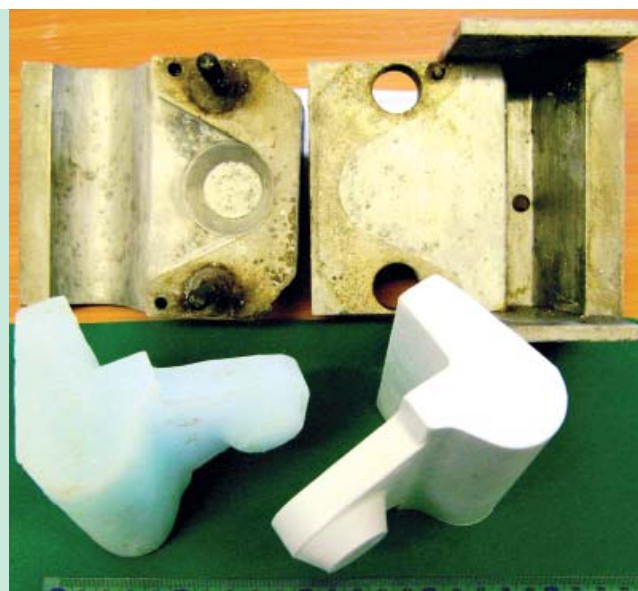
Привлечение криотехнологии в формовочные процессы, в частности для получения песчаных форм по ледяным моделям, вызвано возможностью замены органических материалов (в т.ч. модельных и связующих) для получения оболочковых форм. А применение агрегатных переходов воды (из жидкого в твердое при замораживании модели, опять в жидкое при таянии модели и освобождении полости формы, а затем испарение при сушке увлажненной формы) в какой-то мере подобно кругообороту воды в природе. Заимствуя у природы идею цикличности материальных ресурсов как метод экологизации производства, ученые при создании новых производственных технологий стремятся приблизить их к соответствию биосферным законам, и в первую очередь закону круговорота веществ. Так, водная композиция для ледяных моделей на 30...90% и сухой песок формирующей на 70 – 90% (за вычетом песка участвующего в образовании оболочки путем пропитки – увлажнения), может использоваться многократно. Имеется разновидность ВПФ по ледяным моделям, при которой вода не попадает

в песок формы и может полностью использоваться повторно наряду с многократным использованием песка [2]. На рис. 1 показан ряд примеров из технологического процесса литья по ледяным моделям: а) ледяных моделей звездочек цепного конвейера, отливаемых из стали, б) оснастки и ледяной модели кокиля для литья художественной детали, в) мелких песчаных оболочковых форм, распиленных для исследования их поверхности.

Задачей настоящей статьи является расчет и сравнение энерго- и материальных затрат на изготовление песчаных форм по разовым пенополистироловым (ППС) газифицируемым (способ ЛГМ, Lost Foam Process) и ледяным моделям на одну тонну чугунных отливок массой 1 – 10 кг, поскольку на данном этапе технология литья по ледяным моделям опробована на примерах получения чугунных и алюминиевых отливок. Некоторую аналогию можно провести со статьей [3], в которой срав-



а)



б)



в)

Рис. 2. Примеры получения ледяных моделей по оснастке для производства пенополистироловых моделей.

ниваются затраты на изготовление стальных отливок в замороженных и сырых песчаных формах, а также подчеркивается, что при недостаточном знакомстве с криотехнологией возникает суждение о значительном превышении ее энергоемкости по сравнению с традиционными процессами литья.

Сравниваемые технологии во многом подобны. О некоторой пре-емственности технологии получения ледяных моделей по отношению к способу ЛГМ свидетельствует то, что для изготовления ледяных моделей вполне пригодна оснастка, используемая для получения ППС моделей. После предварительного охлаждения до минусовых температур стыки по разьему деталей оснастки не пропускают заливаемую в ее полость водную композицию, которая мгновенно замерзает в тонких

щелях и уплотняет их, снимая проблему герметизации пресс-форм, изначально служащих для получения ППС моделей (заявка на изобретение UA 200909910, опубл. 2011, бюл. № 7). На рис. 2 показаны примеры получения ледяных моделей по такой оснастке: а) ледяной модели диска сцепления автомобиля ГАЗ-24, б) оснастка и модели кронштейна, ледяная (слева) и из ППС (справа), в) модели обрамления подборщика комбайна, ледяная (слева) и из ППС (справа), по середине – стальная отливка.

Проведем расчет указанных затрат при ЛГМ-процессе. При плотности жидкого чугуна 7000 кг/м^3 объем 1000 кг отливок или объем моделей на эту массу отливок составит $\approx 0,143 \text{ м}^3$, а при средней плотности ППС для моделей 25 кг/м^3 расход ППС на 1000 кг фасонных отливок составит $25 \cdot 0,143 = 3,58 \text{ (кг)}$. Если учитывать, что технологический выход годного мелких чугунных отливок составляет не менее 85%, то с литниково-питающей системой расход ППС на 1000 кг отливок равен около $4,2 \text{ кг}$, из них — $0,6 \text{ кг}$ обычно изготавливается из блочного ППС ценой около $\$1,9/\text{кг}$ и стоимостью $\$1,1$. Наиболее распространенный способ получения ППС моделей — спеканием из гранул, подвспененных до насыпной плотности на уровне 25 кг/м^3 . Расход электроэнергии на подвспенивание для подвспенивателей с циклическим

действием (в ванне с кипящей водой) и с непрерывным (полуавтоматическим) процессом приблизительно равны, т. к. для полуавтомата используется парогенератор, источник сжатого воздуха, циркуляция воды для охлаждения приемного бункера, а также транспортная система для сушки и выдержки гранул в бункерах.

Время подвспенивания зависит от марки исходного ППС, количества загрузки и при использовании подвспенивателей конструкции ФТИМС, равно $3 - 8 \text{ мин}$. Объем загрузки составляет $200 - 1200 \text{ см}^3$ в зависимости от потребности, или по массе $0,34 - 2,04 \text{ кг}$ первичного ППС. Установленная мощность подвспенивателя $Ny \geq 11 \text{ кВт}$. Для первичного подвспенивания $3,58 \text{ кг}$ необходимо $3,58/2,04 = 1,75$ цикла загрузки, что достигается двумя загрузками суммарной продолжительности $T=16 \text{ мин}$. с учетом подготовительных работ. При этом расход электроэнергии на подвспенивание ППС для 1000 кг отливок составляет $P=Ny \cdot T/60=11 \cdot 16/60=2,93 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)}$. С учетом дополнительного расхода электроэнергии на изготовление моделей литниковой системы (в дополнение к фасонным моделям) из блочного ППС методом вырезания нагретой проволокой, а также сборки тепловым методом расход энергии вместе с затратами на подвспенивание ППС не превышает $3,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, что по стоимости составит $3,5$

$\cdot 0,063=\$0,22$ (по тарифу на электроэнергию на начало 2011 г. для промышленных предприятий Украины).

Определим расход электроэнергии на получение фасонных моделей спеканием подвспененного ППС в алюминиевые пресс-формах, помещенных в камеру объемом 100 л автоклава ГК 100-2 с установленной мощностью 12 кВт . Продолжительность спекания модели для отливки массой $1 \dots 10 \text{ кг}$, не превышает 3 мин . Например, для получения моделей отливки массой $\sim 10 \text{ кг}$ суммарное время спекания 100 моделей зависит от числа одновременно загружаемых пресс-форм. При загрузке одной пресс-формы в автоклав это время составит 300 мин . с затратами электроэнергии $12 \cdot 300/60 = 60 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)}$, а для 4-х местной пресс-формы – в 4 раза меньше, $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, что по стоимости составит $60 \cdot 0,063 = \$3,8$ и $\$0,95$.

Средняя цена ППС типа ПСВ-Л1 марок 1...5 (ОСТ-301-05-202-92Е) производства Сибур, Россия, или аналогичного производства BASF, составляет порядка $\$5,6/\text{кг}$ (при покупке до десятков килограмм в месяц), или $\$20$ на 1000 кг отливок. Максимальный расход противопожарной защитной краски на эту массу отливок (покрытие ППС моделей / модельных кузов) составляет 60 кг , при среднем потреблении с соблюдением технологии нанесения краски толщиной слоя $0,6 \dots 0,8 \text{ мм}$ около $35 \dots 40 \text{ кг}$ для поверхности моделей отливок средних по массе и сложности конфигурации. Составу краски при ЛГМ уделяют большое внимание, она несет противопожарную, герметизирующую и упрочняющую поверхность песчаной формы функции. Стоимость готовой краски зависит от типа разбавителя (вода или спирт), а также от вида порошковых составляющих. По данным различных поставщиков цена 1 кг водной краски не превышает $\$2,5$. Средняя стоимость краски в этом случае на 1000 кг отливок составит $\$100$.

Расход электроэнергии для приготовления, нанесения и сушки противопожарного покрытия в сушильных шкафах конструкции ФТИМС с установленной мощностью сушильного шкафа 2 кВт не превышает $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. В летнее время расход электроэнергии может быть меньше при естественной сушке. Продолжительность сушки при исполь-

зовании водной краски не более 3 ч , спиртовой – $0,5 \text{ ч}$. Продолжительность сушки моделей общей массой $3,58 \text{ кг}$ не более 10 ч . при стоимости электроэнергии на сушку около $\$0,63$.

Расход электроэнергии на изготовление литейной формы из сухого песка в контейнере включает использование вибростола и системы подачи песка. Максимальная установленная мощность вибростола $1,5 \text{ кВт}$. Продолжительность виброуплотнения одной литейной контейнерной формы при массе получаемых в ней отливок $50-100 \text{ кг}$ обычно составляет 1 мин . Продолжительность виброуплотнения для 20 форм составит порядка 20 мин. , а расход электроэнергии $0,5$

кВт·ч, а стоимость $\$0,03$. Расход электроэнергии при вакуумировании формы во время заливки зависит от применяемого вакуумного оборудования и мощности установленного насоса. Мощность /производительность насоса рассчитывается из производственных потребностей литейного цеха и типа вакуумной системы. Время заливки одного контейнера не превышает 1 мин. , а продолжительность заливки 1000 кг отливок зависит от объема ковша, системы транспортировки от печи до зоны заливки форм. По опыту использования из лещей типа ИСТ время заливки такой массы чугуна не превышает 10 мин . Соответственно время работы вакуумной системы для откачки газов из заливаемых форм не превышает 15 мин . при мощности насоса не более 18 кВт (марки ВВН-12). Расход электроэнергии на заливку соответственно не будет превышать $4,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ стоимостью $\$0,28$.

Весьма энергоемким процессом при ЛГМ является технологический процесс подготовки формовочного песка, находящегося в многократном обороте с восполнением потерь до 5%. Этот процесс включает очистку от включений, обеспыливание, охлаждение до температуры ниже $+40^\circ\text{C}$, транспортирование к соответствующим технологическим площадкам. Объем потребляемого формовочного песка на тонну мелких отливок из железуглеродистых металлов составляет не более $2,0 \text{ м}^3$. При использовании охладителя для создания псевдокипящего слоя песка производительностью $6 \dots 7 \text{ т/ч}$ (или $4 \dots 4,5$

$\text{м}^3/\text{ч}$), выбросита соответствующей производительности, а также системы пневмотранспорта всасывающего типа общая установленная мощность этого оборудования не превышает 30 кВт . Соответственно расход электроэнергии будет в пределах $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ или $\$0,63$ на тонну отливок при стоимости песка в обороте объемом $2,0 \text{ м}^3$, массой $3,0 \text{ т}$ стоимостью 300 грн . К расходам для получения 1000 кг отливок необходимо отнести также безвозвратные потери формовочного песка, не более 5% от используемого в цикле от одной формовки до следующей. На практике эти потери составляют на 1000 кг отливок около 100 кг стоимостью $\$1,25$.

В рассматриваемом ЛГМ-процессе по сравнению с литьем в формы связующим статьями экономии материальных и финансовых ресурсов, а также рабочих площадей является отсутствие стержневого производства, упрощение выбивного участка и линии регенерации формовочного материала (часто монтируемой у внешней стены здания цеха на открытом воздухе), уменьшение отходов, а также упрощение вентиляции производственных участков литейного цеха. Эти статьи экономии намного превышают затраты на вакуумную систему.

Рассмотренные затраты на формовку для получения 1000 кг чугунных отливок ЛГМ- процессом показаны в табл. 1. Финансовые затраты, без учета затрат на металл и его плавление, составляют $\$125,25$, а с учетом стоимости песка, находящегося в обороте $\$162,75$ на 1000 кг отливок. Заработную плату и др. отчисления не учитывали.

Расчет стоимости затрат на получение 1 т отливок по ледяным моделям. Главной статьей затрат является электроэнергия, которая в основном идет на замораживание модельной жидкости, формовку и сушку песчаной формы. Так как основная часть модельной жидкости составляет вода, то для расчетов использовали ее теплофизические коэффициенты. Тепловые потери от излучения и изменение удельной теплоемкости от температуры в узком интервале температур от 20 до -15°C вблизи точки плавления льда не учтены в расчетах. Поскольку отработку технологии литья по ледяным моделям выполняли на мелких отливках, то расчет затрат произведем на примере

Таблица 1. Затраты материалов и энергии для изготовления форм на 1 т отливок при ЛГМ

№ п/п	Технологические операции	Расход/стоимость на 1000 кг отливок				Примечание
		ППС, кг/\$	Огнеупорн. краска, кг/\$	Песок, кг/\$	Эл. энергия, кВт·ч/\$	
1	Подвспенивание	4,2 / 21,26	-	-	3,5 / 0,22	-
2	Изготовление моделей	-	-	-	15 / 0,95	4-х местная пресс-форма
3	Покраска моделей	-	40 / 100	-	10 / 0,63	И сушка
4	Формовка	-	-	100/1,25	0,5 / 0,03	Потери песка
5	Заливка	-	-	-	4,5 / 0,28	Вакуумирование
6	Формовочный песок в обороте	-	-	(3000/37,5)	10 / 0,63	Подготовка, транспортирование
	Итого: \$125,25	4,2 / 21,26	40 / 100	100 / 1,25	43,5 / 2,74	Без учета песка в обороте.

получения чугунной отливки массой ~1 кг цилиндрической формы диаметром 50 мм и высотой 73 мм. Объем жидкого металла такой отливки 143 см³ равен объему ледяной модели массой 130 г. Для получения такой модели использовали алюминиевую пресс-форму (плотность алюминия 2,9 г/см³), состоящей из цилиндра и двух крышек (все толщиной 10 мм) с устройством сборки и отверстием для заливки. Масса такой пресс-формы равна 621,8 г (корпуса – 398,8 г и двух крышек - 223 г).

Для расчета выбрали по справочникам следующие теплофизические коэффициенты. Удельная теплоемкость Ср, кДж/(кг·град.), алюминия 0,88 в интервале изменения температуры Δt = 35°C, воды – 4,19 при Δt = 20°C и льда - 2,11 при Δt = -15°C, удельная теплота плавления льда λ = 334 кДж/кг [4, 5]. Количество теплоты Q, которое необходимо отвести от пресс-формы и воды от температуры + 20°C до температуры –15°C, составит Q = cmΔt, где, кроме указанных, m – масса пресс-формы, модельной жидкости или льда [4]. Тогда тепловая энергия на 1000 кг отливок, отведенная при охлаждении оснастки, составит 0,88 · 621,8 · 35 = 19151,4 (кДж), жидкого модельного материала 4,19 · 130 · 20 = 10894,0 (кДж), ледяной модели 2,11 · 130 · 15 = 4114,5 (кДж), а также затраченная на фазовый переход при замерзании воды 130 · 334 = 43420 (кДж), что в сумме равно 77579,9 кДж или 21,55 кВт·ч.

Определим энергозатраты на изготовление модели с литниково-питающей системой при технологическом выходе годного для мелких чугунных

отливок не менее 85%, 21,55/0,85 = 25,35 (кВт·ч). Это сопоставимо с затратами 25,7 кВт·ч на 1000 кг отливок из железоуглеродистых сплавов, определенных по результатам экспериментов при построении термограмм замораживания моделей из водных композиций трех видов до температуры -12°C [6], а также можно сравнить с затратами по отбору тепловой энергии 59,5 кВт·ч на 1000 кг стальных отливок при литье в замороженную форму, охлажденную до -30°C [3]. Заметим, что для ледяных моделей экономичнее выполнение трубчатых пустотелых стоек из полимерных материалов (патент UA 85515), применение которых связано с энергозатратами величиной не более 5% от затрат на охлаждение модели.

Для оценки затрат электроэнергии на питание холодильника наиболее распространенного компрессионного типа, отметим, что компрессор мощностью 5 – 10 кВт имеют коэффициент подачи порядка 0,6, что вместе с КПД соответствующего трёхфазного электродвигателя при номинальной нагрузке в пределах от 83 до 95% (верхний предел соответствует двигателям большой мощности) - дает общий КПД, приближающийся к 0,55. У больших винтовых компрессоров в сотни киловатт общий КПД может достигать 0,7 – 0,75. Существуют также иные причины понижения КПД холодильников – это механические потери и термодинамические потери, однако они менее существенны, и для поставленной задачи правомерно использовать КПД ~0,5. Тогда затраты электроэнергии на получение ледяной модели с литниково-питающей системой составят 50,7 кВт·ч.

В расчетах учитываем, что стоимость 130 кг модельной жидкости, состоящей не менее 90 % из технической воды составит \$1/ м³ · 0,143 м³ = \$0,143. Стоимость других добавленных в нее компонентов до 10% по массе, в основном жидкого стекла натриевого (ГОСТ 13078-81) плотностью на ниже 1,36 г/см³, составит не более \$12,5 на тонну отливок. Следующая статья затрат касается сухого покрытия, наносимого на ледяные модели толщиной до 2-3 мм и составляющего основу оболочковой формы после выплавления модели. Объем присыпки для приближенных расчетов можно принять равным 15% объема модели, или 21 дм³, что по массе составит 32 кг на тонну отливок. Основная составляющая присыпки – кварцевый песок мелкой фракции с добавкой гидратационных вяжущих, твердеющих в контакте с водой (гипс, цемент и т. п.) [6]. Стоимость разработанного по НИР состава присыпки ~ \$0,19/кг, а стоимость 32 кг присыпки, расходуемой на 1 т отливок, составляет \$6.

Для получения оболочковой формы ледяную модель с покрытием помещают в металлический контейнер, который заполняют сухим песком, выплавляют модель нагреванием теплотепередачей от окружающего песка с температурой воздуха в помещении цеха (+20°C), горячей водой или теплым воздухом. Ледяная модель в процессе таяния частично пропитывает присыпку с прилегающим слоем песка и затвердевает, создавая оболочковую форму. Излишек жидкости откачивается или выливается, а форма подвергается высушиванию с применением вакуума или теплого воздуха. Электрическая

Таблица 2. Затраты материалов и энергии для изготовления форм на 1 т при литье по ледяным моделям

№ п/п	Технологические операции	Расходы/стоимость на 1000 кг отливок				Примечание
		Модельная жидкость, кг/\$	Покрытие кг/\$	Песок, кг/\$	Электро- энергия, кВт·ч/\$	
1	Получение ледяной модели	130/12,64	-	-	50,7 / 3,18	-
2	Покрытие ледяной модели	-	32 / 6	-	-	-
3	Получение оболочковой формы (плавление модели)	-	-	100 / 1,25	13,2 / 0,83	Безвозвратн. потери песка
4	Сушка оболочковой формы	-	-	-	10 / 0,63	Или вакуумир.
5	Форм. песок в обороте	-	-	(3000/37,5)	10 / 0,63	Подготовка.
	Итого: \$25,16	130/12,64	32 / 6	100 / 1,25	83,9 / 5,27	Без учета оборотн. песка

энергия затрачивается на расплавление и/или создание вакуума в форме и не превышает расходов на затвердевание и охлаждение ледяной модели, т. е. 13,2 кВт·ч на 1000 кг отливок, или \$0,83, а расходы на сушку такого количества оболочек теплым воздухом составляют до 10 кВт·ч, т. е. \$0,63. К безвозвратным потерям необходимо отнести формовочный песок, входящий в состав оболочки, объем его потерь не превышает потери при ЛГМ, т.е. до 100 кг стоимостью \$1,25. Стоимость и объем формовочного материала, находящегося в обороте, аналогичны процессу ЛГМ. Общие расходы сведены в таблицу (табл.2).

В расчете затрат рассматриваемых процессов не учтены расходы на плавку металла, транспортные расходы (перемещение оснастки, шихты, отливок, форм и т. п.), заработная плата и другие отчисления, которые примерно равны при использовании обоих рассматриваемых процессов. Общие рассматриваемые затраты на изготовление ледяных моделей и формовку на 1 т отливок составляет \$25,1.

Необходимо отметить, что полученная оболочковая форма может длительно храниться на складе, как и модель или форма при ЛГМ. Приведенные выше расчеты выполнены исходя из получения отливок различной конфигурации с размерами до 300 мм в опытно-производстве ФТИМС НАНУ. Серийное получение ледяных моделей отливок массой выше 5 кг потребует морозильной установки для складирования моделей, в том числе перед сборкой их в блоки, смонтированных на модели литникового коллектора.

В связи с тем, что расход электроэнергии по табл. 2 почти в 2 раза выше, чем по табл. 1, для экономии электроэнергии возможно применение жидкого азота технического (ГОСТ9293-74) для замораживания ледяных моделей. Используя данные, приведенные в работе [3], определим возможные затраты жидкого азота на получение ледяных моделей. При испарении 1 кг жидкого азота поглощается 48 ккал., нагрев образовавшихся паров до -15°C дает дополнительно еще 43,3 ккал. Для получения 1 т отливок по ледяным моделям отвод тепла 25,35 кВт·ч в пересчете составляет 21797,1 ккал, на что потребуется 21797,1 / 91,3 = 238,7 кг жидкого азота. При закупке жидкого азота в количестве от 1 т и поставке вблизи предприятия-производителя цена его на март 2011 г. составляет \$150/т (ЧП «Трансгаз», г. Днепропетровск), а стоимость на 1 т отливок будет \$35,8, и его применение даст экономии электроэнергии на 60 %, но увеличит общую стоимость материалов и энергии на изготовление 1 т отливок в 2,6 раза до \$60,9, что может быть оправдано в районах с ограничением по электропитанию.

Сравнение результатов двух расчетов, представленных в табл. 1 и 2, свидетельствует о пятикратном снижении суммарных затрат на материалы и электроэнергию для формовки при переходе от ЛГМ к литью по ледяным моделям благодаря низкой стоимости модельных материалов, в которых доля воды составляет более 90%. Однако, применение криотехнология связано с работой холодильных машин, что дает повышение энергозатрат на 93 % (на

40,4 кВт·ч), из которых 28,4 кВт·ч идет на отвод тепла при обеспечении фазового перехода - замерзании водной модельной композиции. По сути, эти энергозатраты криотехнология переводит в холод, создавая 1) ледяную конструкцию модели (в отличие от пенополимерной), которая затем при таянии в сухом песке формы 2) участвует в связывании песка с минимальным его загрязнением. Такая двойная роль модели из недорогих материалов дает «проигрыш» на электроэнергии, но «выигрыш» на стоимости материалов и предотвращении ущерба, наносимого окружающей среде.

Литература

1. Ткаченко С. С., Кривицкий В. С. Станкостроение и модернизация литейного производства // Лит. пр-во сегодня и завтра: труды 8-й Всероссийской научно-практич. конф-и. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. С. 3-17.
2. Дорошенко В. С. Криотехнология проникает в литейное производство и повышает его экологическую культуру // Экологический вестник России. - М. -2010. - №10. - С. 28 - 34.
3. Грузман В. М., Шалаев Д. Н. Некоторые экономические аспекты процесса литья в замороженные формы // Литейное производство – 2000, № 7. С. 36-37.
4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.:Наука, 1972.-256 с.
5. Кулиниченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам. К.: Техника, 1990. - 165 с.
6. Дорошенко В. С., Черныш А. Г. http://www.holodilshchik.ru/lcy_models_for_litho_of_the_metal.pdf