

## Summary

Nikolaev V., Vasylyev A.

### The influence of strip temperature on cold-rolling parameters

The results of theoretical researches of the influence of strip back-end temperature on rolling parameters are described. It was shown the influence of strip temperature elevation in the transition process sections (strip back-end and weld-seam). This influence permits to decrease energy-power rolling parameters by 14,3-15,9 % and by 18-30 % of strip back thickness. The described process reduces metal rate to crop-ends. The most effective start rolling temperature  $t_{\text{н}} = 150$  °C, when the visible change of deformation parameters begins, was defined.

## Keywords

rolling, transition process, strip back-end, thickness, roughness, strip, reduction

Поступила 30.03.10

УДК 621.744.072.2

**В. С. Дорошенко, К. Х. Бердыев, В. А. Болюх**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Вакуумные системы формовочно-заливочных участков цехов ЛГМ

Рассмотрена методика конструирования и расчета вакуумных систем формовочных участков с учетом ряда разнообразных факторов, принятых во внимание при определении производительности насосов, пропускной способности очистных и трубопроводных элементов. Приведены две схемы вакуумных систем литейных участков. Информация будет полезна при организации современных участков ЛГМ и ВПФ, которые подымают бы экологическую культуру производства и обеспечили выпуск высокоточных отливок из различных сплавов.

**Ключевые слова:** вакуум, литейный цех, литейное производство, конструирование, ЛГМ, ВПФ

С появлением вакуумируемых форм из сухого кварцевого песка началось развитие технологии формовки без связующего. Первый патент (ФРГ) на литье по газифицированным моделям (ЛГМ) в вакуумируемую форму выдан Е. Кржижановскому в 1968 г., а с 1971 г. в Японии (и далее по всему миру) началось освоение литья методом вакуумно-пленочной формовки (ВПФ). В обоих случаях формовка со склеиванием частиц формовочной смеси путем создания мостов между зернами песка, когда прочность связывания зависит от сил когезии и адгезии, уступила место уплотняющему ком песка перепаду атмосферного и пониженного внутриформенного давления воздуха в порах этого песка. Этот перепад вместо химической связи резко увеличил силы трения частиц песка и создал упругие сжимающие напряжения, удерживающие песок формы в неподвижном состоянии при действии какой-либо технологической нагрузки, включая давление залитого металла.

С одной стороны, исключение связующего из формы на порядок и более уменьшило выбросы вредных газов в атмосферу цеха и значительно повысило культуру производства, способствовало ре-

сурсосбережению за счет многократного рециклинга песка без экологически вредных отходов (формы со связующим дают до 80 % загрязнений литейного производства), увеличило точность отливок за счет исключения прилипания к моделям смеси (снижены или устранены уклоны и припуски на моделях) и уплотнения ее без значительных силовых нагрузок. С другой стороны, вакуумирование потребовало от литейщиков понимания сущности баланса давлений на поверхности полости формы и способов ее поддержания в статичном состоянии, что часто связано с регулированием газопроницаемости поверхностных слоев формы, а также степени и способом вакуумирования, особенно важных в момент заливки и затвердевания отливки.

Слабое внедрение вакуумируемых форм в отечественное производство (и страны СНГ) объясняется низкой осведомленностью литейщиков о достаточно несложных принципах регулирования газового давления на границе металл – вакуумируемая форма, (на весьма простом, однако смонтированном по законам газодинамики и гидравлики в комплекте с системой очистки газов, преимущественно отечественном

оборудовании для обеспечения форм вакуумом). Неуверенность в новых для отечественного литейщика технических принципах и знаниях способствует выбору знакомой формовки со связующим при выборе технологических процессов для своего цеха (особенно при рекламе и другом стимулировании импортеров для ХТС). Расширение применения ХТС сопровождается усугублением неблагоприятной экологии литейного цеха, что привело к тенденции вытеснения литейного производства из Западной в Восточную Европу, если его не переводят на качественно новый, в первую очередь, экологический уровень.

Применению вакуума в форме при ЛГМ предшествовало то, что газы от деструкции пенополистироловой (ППС) модели отводились через перфорации опок и проколы в песчаном наполнителе в атмосферу цеха, что по сегодняшним меркам просто недопустимо. Дальнейшие исследования физико-химии процесса ЛГМ и применение вакуума дали новые положительные результаты для получения качественных отливок и повышения экологии производства. Проведенные специалистами ФТИМС НАНУ научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, большая часть которых была осуществлена под руководством проф. О. И. Шинского (ФТИМС НАНУ), определили параметры необходимого вакуума в опоках, что привело к созданию ряда новых разновидностей этого способа литья и соответствующего технологического оборудования, обеспечивающего целостность литейной формы при заливке, стабильного получения точных и качественных отливок.

Рассмотрим *принципы вакуумирования форм и методики расчета* параметров соответствующего оборудования на примере ЛГМ. Во многом это оборудование подобно используемому на участках ВПФ. Степень разрежения (вакуума) в литейной опоке (контейнере) зависит от вида заливаемого металла и обычно колеблется от 460 до 200 мм рт. ст. (0,60-0,25 атм). Одним из главных факторов, определяющих объем газов деструкции при одной и той же марке ППС модели, является температура заливаемого металла от 650 (для алюминиевых сплавов) до 1800 °С (для жаростойких железоуглеродистых).

Изучение физико-химических процессов взаимодействия жидкой фазы и паров ППС модели с затвердевающим и жидким металлом отливки в песчаной форме привело к выяснению требований к формовочным материалам – их плотности, газопроницаемости и теплофизическим свойствам. Адсорбентом продуктов разложения твердого ППС при ЛГМ потенциально является как металл отливки, так и формовочный материал. Одним из главных результатов применения вакуума при ЛГМ во многих случаях явилось практически полное исключение жидкого металла из числа таких адсорбентов при заливке и сопутствующих ей физико-химических процессов, а также достижение устойчивого механизма получения прочной песчаной формы.

При этом были исследованы смачиваемость

различных формовочных материалов продуктами деструкции ППС (адгезионные процессы), прямые и обратные химические реакции между материалом и формой, диффузионные и тепловые процессы переноса, зависимость прочности формы и скорости откачки газов от гранулометрического состава формовочных материалов, их теплостойкость. Наиболее экономически приемлемыми и технически пригодными оказались кварцевые пески с размерами зерна в пределах 0,2-0,3 мм с содержанием пылевидных частиц размерами менее 0,05 мм не более 6-8 %, плотностью в пределах 1,45-1,65 г/см<sup>3</sup> и влажности не выше 0,5-0,6 %. Поскольку основным фактором, стабилизирующим прочность формы, является вакуум, уплотняющий ее перепадом газового давления вне и внутри песчаной формы, то надежность работы и грамотная эксплуатация всей вакуумной системы – определяющие показатели в процессе формовки и заливки.

При расчете вакуумной системы участка (цеха) ЛГМ прежде всего исходят из ее функционального назначения: будет ли она использоваться для формовки и заливки, пневмотранспортирования формовочного материала (песка), обеспечения работы модельных полуавтоматов, то есть отдельной для всех технологических площадок, или общей. Это обычно зависит от годовой производительности участка ЛГМ и организации производственного процесса. Порядок и правила расчета пневмотранспорта всасывающего типа (вакуум-транспортная система) приведены в учебниках и справочниках [1], а предварительные и приближенные расчеты вакуумных систем формовочно-заливочного участка (ФЗУ) ЛГМ можно вести по данным, приведенным в [2-4].

Некоторая сложность расчетов вызвана отсутствием единых справочных числовых характеристик протекающих физико-химических, термо- и газогидродинамических процессов, необходимых для определения скорости деструкции ППС модели, образуемого объема газов с учетом газового взаимодействия этих продуктов деструкции с формовочным материалом, подвергаемым вакуумированию. Многофакторность изменяемых параметров, которые усложняют процесс расчетов, демонстрируется следующим примером. Если пористость уплотненного формовочного кварцевого песка составляет 35-38 % [4], то не ясно, как будет изменяться площадь межзеренного сечения (как газового канала) при конденсации паров газа на поверхности песчинок. Модели из одной марки ППС при литье сплавов с разными температурами газифицируются по-разному, создавая различные давление и объем газов деструкции за единицу времени. Кроме этого, происходит уменьшение пор за счет термического расширения зерен песка, что также изменяет общую площадь проходного сечения формовочного материала. Одновременно, по мере перемещения газов в толще песка, происходит его охлаждение, которое вызывает соответствующее уменьшение объема газов, исходящих преимущественно из зазора между зеркалом заливаемого жидкого металла и твердой частью ППС модели при ее

термодеструкции. По законам гидродинамики, при обтекании тела скорость текущей жидкости или газа на поверхности тела равна нулю. В межзеренном пространстве с порами, составляющими микрометры, сопротивление течению газа также зависит от шероховатости и угловатости зерен, их фракционного состава. Шероховатость газовых каналов при ЛГМ – величина непостоянная, так как вокруг песчинок образуется «рубашка» из сконденсированных продуктов испарения ППС. Кроме того, жидкая составляющая деструкции ППС проникает до 60 мм вглубь песка формы за счет вакуума, также уменьшая площадь прохода газов. При многократном обороте песка песчинки покрываются углеводородными и сажистыми пленками, очистку от которых выполняют в разработанных в ФТИМС установках терморегенерации песка. Вышеприведенные аргументы учитывают при закладывании запаса производительности вакуумных насосов в откачивающих системах формовочно-заливочных участков ЛГМ.

Другая особенность работы вакуумных систем при ЛГМ и ВПФ – наличие частиц формовочного материала – песка в отсасываемых газах, количество которых может составлять 0,1-3,0 % от объема, что зависит от конструкции опок. Попадая в насос, частицы песка быстро изнашивают его внутренние части. Применение циклонов различных типов не решает полностью эту проблему, так как теоретически степень их очистки составляет не более 97 % от их пропускной способности. Производственная практика специалистов ФТИМС при эксплуатации вакуумных систем ФЗУ показала необходимость разработки жидкостных песко- и пылеотделителей. Их использование на ряде предприятий показало высокую эффективность очистки газов, что привело к увеличению срока службы насосов. Требуемая производительность и величина вакуума на выходе из литейной формы или одновременно вакуумируемых форм – основной критерий выбора вакуумного насоса.

Степень разрежения, создаваемого насосом в опоке-контейнере, должна быть (мм рт. ст.) около 400-460, для отливок из черных металлов – 150-200, если производство проектируется для получения отливок из алюминиевых сплавов. Проведенные исследования показали, что температура газов деструкции в зазоре между зеркалом металла и моделью может достичь 1/2 температуры заливаемого металла, и далее, перемещаясь на выходе из контейнера, может иметь от 1/5 до 1/4 температуры металла. Объем и температура отсасываемых газов колеблются в широких пределах с учетом перечисленных физико-химических процессов, объема, качества и физико-механических свойств формовочного материала, массы, объема и вида металла отливки, расположения модели в контейнере, температуры окружающей среды, марки применяемого ППС.

Для расчета объема отсасываемых газов необходимо исходить из законов сохранения массы и энергии, термо- и гидрогазовой динамики, тепло-массо-переноса. Взаимосвязь объема газа  $V$ , давления  $P$  и температуры  $T$  выражается формулой [2]

$$PV = n_{\mu}RT,$$

где  $n_{\mu}$  – число молей в объеме  $V$  при температуре  $T$  и давлении  $P$ ;  $R = kN$ , где  $k$  – коэффициент, постоянная Больцмана,  $N$  – число молекул в 1 грамм-молекуле. Исходя из этого, можно использовать формулу

$$\frac{PV}{T} = \text{const} \text{ (закон Бойля-Мариотта).}$$

Зная температуру заливаемого металла, массу ППС модели и используя вышеприведенные температуры при ЛГМ, определяют объем газов  $V$  на выходе из литейной формы. Далее расчет всей вакуумной системы можно вести по формулам из работ [1, 2, 5].

*Выбор насоса и элементов вакуумной системы.* Исходя из предназначения вакуумной системы – раздельной по технологическим площадкам или общей на весь производственный цех ЛГМ, производится расчет показателей потребного насоса/насосов. Наиболее оптимальным по экономическим, пожарно-санитарным, эксплуатационным характеристикам является применение сухих кольцевых или водокольцевых вакуумных отечественных насосов серии ВВН или HRB (Корея, Hwahghae Electric). Сухие вакуум-насосы требуют меньше площади без наличия системы водоподготовки и водооборота или -питания, но плохо стыкуются с системой утилизации откачиваемых газов с продуктами деструкции ППС. Конструктивные элементы насоса не должны корродировать в газовой среде. Количество частиц формовочного материала (песка) во входящем в насос газе должно быть минимальным, что требует усложнения элементов пылеулавливания вакуумной системы. Однако в целом применение сухих насосов менее затратно как при монтаже, так и эксплуатации.

Водокольцевые вакуумные насосы (ВВН) для своей работы требуют наличия систем водоподготовки и водо-снабжения. Наибольшая эффективность у них достигается при использовании воды с температурой ниже +30 °С. Другая особенность их работы – наличие воды в выбрасываемом насосом газе, что усложняет работу стоящих за ними установок каталитического дожигания газов с продуктами деструкции в процессе приведения выбрасываемых в атмосферу газов до санитарно-экологических норм – ПДК. Вода при работе ВВН нагревается, что снижает их производительность, а также при достижении температуры +55 °С минеральные включения начинают выпадать из воды в осадок. С целью экономии желательно создавать закрытые замкнутые системы водоснабжения, изначально заполненные дистиллированной водой. Водоёмы открытых систем, особенно расположенных вне цеха, летом зеленеют, что требует их регулярной очистки. Разумеется, этих проблем можно было бы избежать, используя поршневые, золотниковые, роторно-пластинчатые насосы. Но этого нельзя делать, так как во всех этих насосах имеется масло, а откачиваемые газы при выходе из литейной формы имеют температуру намного выше +100 °С. Масло в таких насосах если не горит, то коксует. Кроме того, пары масла,

сконденсировавшиеся на входном трубопроводе, – тоже источник возгорания.

Обязательным элементом вакуумной системы ФЗУ является вакуумный аккумулятор (ВА). Конструкции аккумуляторов, разработанные в ФТИМС емкостью 1-3 м<sup>3</sup>, имеют защитные элементы в виде предохранительных пластин и обратных клапанов, что позволяет легко производить работы по их очистке. Определение толщины стенки ВА производится по формуле [2]

$$S = 0,47 \frac{D}{100} \left( \frac{P_p}{10^{-6} E^t} \frac{l}{D} \right)^{0,4} + C,$$

где  $D$  – внутренний диаметр обечайки, см;  $P_p$  – давление расчетное, кг/см<sup>2</sup>;  $E^t$  – модуль продольной упругости материала при 20 °С, кг/см<sup>2</sup>;  $C$  – поправочный коэффициент (утолщение стенки при эксплуатации);  $l$  – длина обечайки (см. Основное предназначение ВА – обеспечение плавности работы вакуумного насоса).

Описание конструкции водного пылеосадителя, разработанного ФТИМС, приведено в статье [6], а расположение рассматриваемого оборудования на планировке цеха – [7]. Трубопроводы, как указано в [2, 3, 5], должны быть по диаметру согласованы с диаметром всасывающего отверстия насоса и изготовлены максимально короткими. Но для ФЗУ соблюдение этого принципа не всегда оправдано, так как отсасываемые газы имеют большую температуру и нагревают как элементы вакуумной системы, так и воду, снижая тем самым производительность ВВН. Пропускную способность трубопровода определяют по формуле [2]

$$U_T = 12,1 \frac{d^3}{l}, \text{ л/с,}$$

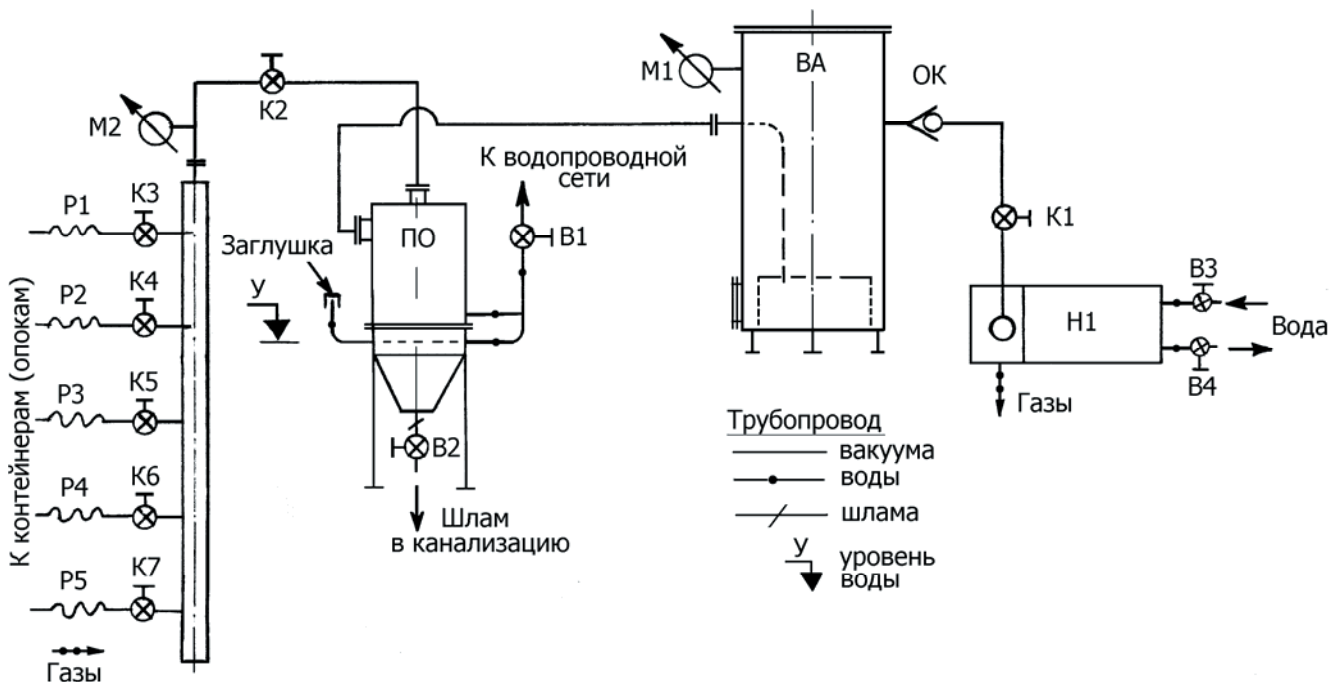
где  $d$  – диаметр трубопровода, см;  $l$  – длина трубопровода, см. Необходимо стремиться, чтобы он соответствовал производительности насоса и имел меньше изгибов.

Опыт эксплуатации запорно-регулирующей арматуры показал, что наиболее надежные и дешевые шаровые краны, которые массово выпускаются с проходными диаметрами от 1/4" до 4", легко монтировать. Как упоминалось выше, откачиваемые газы с продуктами деструкции ППС или синтетической пленки при ВПФ должны очищаться в специальных установках перед выбросом в атмосферу. Для предварительного осаждения частиц формовочного материала рекомендуется использование серийно выпускаемых циклонов разработки ЦАГИ и «Союз-элеватор». С целью экономии производственных расходов и надежности работы вакуумной системы целесообразно вместо одного водного насоса требуемой производительности установить два насоса меньшей производительности и подключить их параллельно.

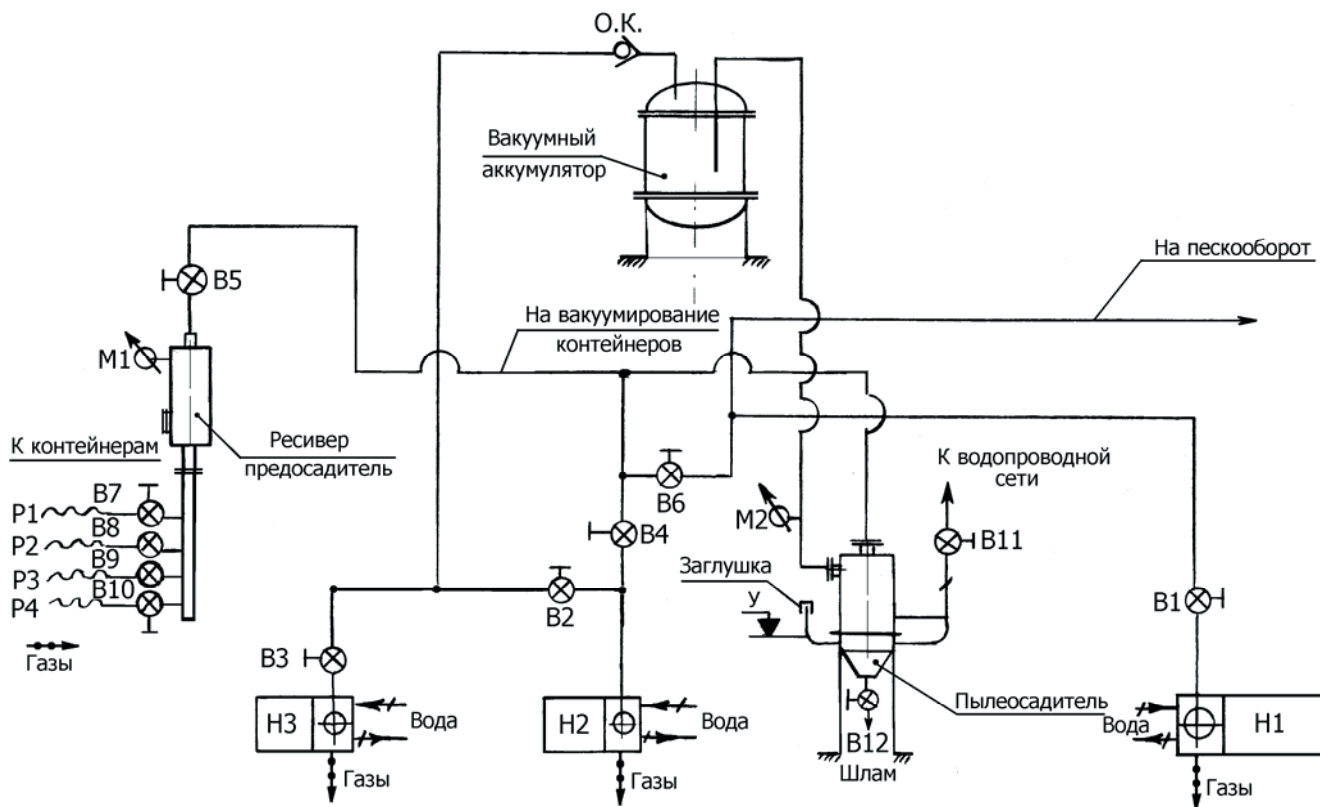
В качестве примера ниже приведены две схемы вакуумной системы участков ЛГМ: на рис. 1 – система предназначена только для формовки и заливки, рис. 2 – для формовки, заливки, обеспечения работы системы подготовки и пневмотранспортирования песка.

### Выводы

Рассмотрена методика конструирования и расчета вакуумных систем формовочных участков с учетом ряда разнообразных факторов, принятых во внимание при определении производительности насосов, пропускной способности очистных и трубопроводных элементов. Оборудование этих систем



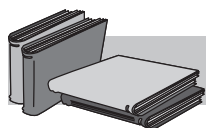
**Рис. 1.** Вакуумная система участков формовки-заливки  $Q \leq 12 \text{ м}^3/\text{мин}$ : Н1 – насос ВВН; ОК – обратный клапан; ВА – вакуумный аккумулятор; М1, М2 – вакууматор 0-1; ПО – пылеосадитель; К1-К7 – краны шаровые; В1-В4 – вентили; Р1-Р5 – рукава; В1-В12 – вентили  
 Примечание: все стенки должны быть герметичными; падение давления в сети не более 0,05 атм (контроль по М1)



**Рис. 2.** Вакуумная система участков формовки-заливки и пескоподготовки,  $Q \leq 50 \text{ м}^3/\text{мин}$ : Н1-Н3 – водокольцевые вакуумные насосы; М1, М2 – манометры; Р1-Р4 – рукава; В1-В12 – вентили; О.К. – обратный клапан

комплектується переважно вітчизняними виробами. Така інформація буде корисною при організації сучасних ділянок ЛГМ і ВПФ,

які можуть підвищити екологічну культуру виробництва і забезпечити випуск високоточних відливок з різних сплавів.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванченко Ф. К. и др.* Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин. – Киев: «Вища школа», 1978. – С. 574.
2. *Овсянников К. М.* Основы расчета вакуумных систем, применяемых в литейном производстве. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 80.
3. *Минаев А. А.* Вакуумная формовка. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 216.
4. *Васильев В. А.* Физико-химические основы литейного производства. – М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1994. – С. 320.
5. *Фролов Е. С. и др.* Вакуумная техника: Справочник. – М.: Машиностроение, 1992. – С. 480.
6. *Дорошенко В. С., Шинский И. О., Бердыев К. Х.* Оборудование непрерывного действия для литья по газифицируемым моделям // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 56-61.
7. *Дорошенко В. С., Бердыев К. Х., Шинский И. О.* Структура цеха литья по газифицируемым моделям и особенности его проектирования // Металл и литье Украины. – 2010. – № 4. – С. 8-16.

### Анотація

*Дорошенко В. С., Бердыев К. Х., Болюх В. А.*

### Вакуумні системи формувально-заливних ділянок цехів ЛГМ

*Розглянуто методику конструювання та розрахунку вакуумних систем формувальних ділянок з урахуванням низки різноманітних факторів, прийнятих до уваги при визначенні продуктивності насосів, пропускної здатності очисних і трубопровідних елементів. Наведено дві схеми вакуумних систем ливарних ділянок. Інформація буде корисною при організації сучасних ділянок ЛГМ і ВПФ, які могли б підвищити екологічну культуру виробництва і забезпечити випуск високоточних виливків з різних сплавів.*

**Ключові слова**

вакуум, ливарний цех, ливарне виробництво, конструювання, ЛГМ, ВПФ

**Summary**

*Doroshenko V., Berdiyev K., Bolyuh V.*

**Vacuum systems of foundry lost-foam shops**

*The method of designing and calculating vacuum systems moulding plots against a number of different factors taken into account in determining the performance of pumps, the capacity of sewage and piping items are considered. 2 plans vacuum systems of casting sites are presented. The information will be useful for the organization of modern Lost Foam foundry sites and V-process sites, that could raise ecological culture of production and to produce precision castings of various alloys.*

**Keywords**

*vacuum, foundry, casting, construction, Lost-Foam model, V-process*

Поступила 22.03.10

**РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ**

*(цены приведены с учетом налога на рекламу)*

<b>3, 4-я страницы обложки</b>		<b>страница внутри журнала</b>	
цветная	1400 грн.	цветная	1050 грн.
черно-белая	700 грн.	черно-белая	500 грн.
<b>1/2 страницы формата</b>		<b>1/2 страницы формата А4</b>	
цветная	900 грн.	цветная	800 грн.
черно-белая	500 грн.	черно-белая	450 грн.
<b>1/4 страницы формата</b>		<b>1/4 страницы формата А4</b>	
цветная	550 грн.	цветная	300 грн.
черно-белая	300 грн.	черно-белая	200 грн.

При повторном размещении рекламы – скидка 15 %

**Редакция журнала может подготовить  
заказной номер журнала**

*Ориентировочная стоимость заказного номера – 6750 грн.  
(объем до 5 уч.- изд. л.)*

*Ориентировочная стоимость заказного спаренного номера – 13000 грн.  
(объем до 10 уч.- изд. л.)*