

## **ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛОВ КАЧЕСТВА В САПР ЛИТЬЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ**

**Становский А. Л., Духанина М. А., Добровольская В. В.**

### **1. Введение**

Литейное производство отличается высокой динамичностью, многомерностью, высокоинтенсивностью, широким диапазоном значений, труднодоступностью для измерений, скрытостью и запаздыванием. Поэтому в нем существует большая потребность в многочисленной информации о текущем состоянии процессов литья, а значит, в метрологической поддержке всех его этапов.

Проблема заключается в том, что именно в литейном производстве почти ничего невозможно точно и адекватно измерять.

И дело даже не в том, что до сих пор не созданы соответствующие методы и средства измерения. Ведь некоторые параметры литейного производства часто не имеют физического смысла, и их приходится «собирать» из других, более или менее измеряемых характеристик. При этом литейщики все дальше и дальше уходят от адекватности результатов измерения реальным параметрами литья.

Это все равно, как искать не там, где потерял, а там, где светло. Поэтому, специалисты-литейщики часто прибегают к «кустарным» методам измерения, а результатом такой «самодеятельности» является то, что больше 50 % стальных отливок, получаемых в песчаных формах, бракуются.

Еще одной важной особенностью литейного производства является то, что его измеряемые внутренние параметры малоинформативны с точки зрения конечного результата – качества отливки.

С другой стороны, современная метрологическая наука и практика позволяют сегодня находить и пользоваться новыми комплексными параметрами – функционалами, объединяющими основные частные характеристики объектов измерения и одновременно существенно влияющими на конечный продукт. Замыкая такие комплексные параметры на результат технологического процесса, исследователи и технологи-литейщики пытаются достичь их адекватности и точности, что в конечном итоге должно положительно сказаться на результатах проектирования и управления литейной технологией.

К сожалению, на сегодняшний день таких функционалов, которые могли бы служить критериями качества литья, не существует, а следовательно, отсутствуют методы и средства их измерений и интерпретации.

### **2. Объект исследования и его технологический аудит.**

*Объект исследования* – процессы проектирования и управления литейным производством, основанные на измерении его частных параметров в системе «стальная отливка – песчаная литейная форма» с последующим пересчетом их в комплексные функционалы.

Технологический аудит представляет собой способ диагностики инновационной и производственной подсистем литейного предприятия, и позволяет получить характеристику инновационного потенциала литейного производства. Проведение технологического аудита дает предприятию возможность сформировать стратегию извлечения дохода из результатов инновационной деятельности. Предполагается, что предприятие-разработчик использует результаты инновационной деятельности непосредственно у себя на производстве, выпуская новую продукцию (стальные отливки) с применением созданных процессных инноваций.

Процедуру оценки коммерческого потенциала инновационной идеи проводили по алгоритму, состоящему из семи последовательных шагов [1]:

- проведение предварительных исследований;
- проведение поиска аналогов;
- проверка технической осуществимости инновационной идеи;
- идентификация продукта (информационной технологии) для сравнения с аналогами;
- определение рыночных преимуществ создаваемого продукта;
- оценка рыночных перспектив создаваемого продукта;
- практическая осуществимость инновационной идеи.

Проведенные исследования подтвердили высокий коммерческий потенциал инновационной идеи: использования нового функционала в качестве критерия качества поверхности стальных отливок.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель работы* – повышение качества стальных отливок, получаемых в песчаных формах, путем увеличения эффективности проектирования и совершенствования управления процессом их изготовления за счет нового информационного обеспечения процессов измерения функционалов качества в САПР литейного производства.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать и выполнить анализ параметра-функционала «газоотводность» в системе «отливка – литейная форма».
2. Оценить точность и достоверность использования комплексного параметра-функционала в качестве критерия бездефектности литья.
3. Осуществить практическое использование результатов исследования с оценкой их технико-экономических преимуществ перед известными методами.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Принято считать [2, 3], что достоверные сведения о физических свойствах подавляющего большинства веществ может дать только эксперимент. В этом утверждении (так же, как и во многих других) слово «эксперимент» можно однозначно заменить на слово «измерение», поскольку исследования заключаются в создании некоторых условий для объекта и измерения отклика параметров объекта на эти условия [4].

В любом случае измерение – это краеугольный камень любого исследования, а от его точности и достоверности зависит достижение цели, ради которой это

исследование вообще проводилось. Особенно важен этот подход, когда и условия исследования и отклики объекта являются многомерными, высокоинтенсивными и трудноизмеримыми, как это чаще всего бывает при литье.

На сегодняшний день в литейном производстве существуют десятки методов измерений различных параметров, представляющих интерес для более, чем 100 способов литья и влияющих на качество отливок. Сюда, прежде всего, следует отнести современные инфракрасные методы измерения температуры [5–7], гидравлические – газопроницаемости [8], емкостные – плотности [9], вихретоковые – пригара [10]. Для получения информации о процессе литья используют структурные [11] и интеллектуальные [12] идентификаторы и многое другое.

В этих способах литья описаны [13] сотни дефектов отливок, противоречащие понятию «качество» и, как правило, приводят к браку. Поэтому для начала сузим проблему и будем рассматривать:

- литье в песчаные формы: песчано-глинистые, песчано-смоляные, керамические и т. д.;
- дефекты поверхностного слоя: пригар, раковины, сколы, неметаллические включения и т. д.;
- параметры, влияющие на эти дефекты: технологические, термические, гидравлические, электрические, механические и тому подобное.

Для измерения последних существуют стандартные методы и соответствующее метрологическое обеспечение. Недостатки существующих методов непосредственно вытекают из следующих соображений.

Диапазоны измерения у существующих средств не совпадают с реальными значениями параметров, имеющими место во время технологического процесса литья, например, газопроницаемость формы измеряется при комнатной температуре, а заливка стали в эту форму осуществляется при температурах 1600–1800 °С. Поэтому существующие средства не позволяют получить сколь-нибудь точное значение измеряемой величины, как функции пространства-времени системы «отливка – форма».

Объективно существует большая взаимозависимость между отдельными измеряемыми параметрами (например, газотворность формовочной смеси существенно зависит от температуры, газопроницаемость формы – от газотворности смеси, температура – от газопроницаемости и т. д. по кругу) [14].

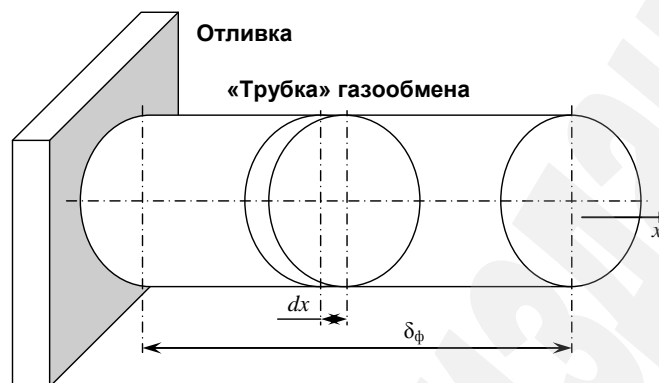
Все это приводит к тому, что полученные отдельными измерениями значения параметров, как правило, не информативны с точки зрения проектирования и управления литейными процессами.

## **5. Методы исследования**

Для решения этих проблем в работе было предложено выполнять измерения многих параметров в разных точках пространства-времени системы «отливка – форма» с последующей сверткой их значений к единому числу – результату измерения.

К ним, в первую очередь, относили параметры, вытекающие из конструкторских и технологических характеристик непосредственно литейного объекта – лабораторного или реального производственного:

$\delta_6$  –  $1/2$  толщины плоской отливки, м;  
 $\delta_\phi$  – толщина плоской стенки формы, м;  
 $\rho_\phi$  – плотность материала формы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\alpha_{зв}$  – концентрация связующего в материале формы;  
 $F_1$  – единичная площадь «трубки» газообмена (рис. 1), м<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** «Трубка» газообмена в границах стенки формы толщиной  $\delta_\phi$

Во-вторых, принимали во внимание параметры, которые измеряли в формовочной смеси до изготовления формы и ее заливки.

ГП – газопроницаемость формовочного материала, измеренная по стандартной методике, м<sup>4</sup>/(Н·с). Газопроницаемость – это способность формовочной смеси пропускать через себя заданное количество газов под стандартным давлением.

ГТ – газотворность формовочного материала, измеренная по стандартной методике, м<sup>3</sup>/(кг·с).

Большую газотворность имеют смеси с синтетическими смолами, низкую – смеси с неорганическими связующими, например, жидким стеклом, глиной [13].

Третья группа параметров – это результат динамических измерений непосредственно в системе «отливка – форма» после заливки. Здесь определяемая величина, изменяется во времени:

$T_1(\tau)$  – температура внутреннего (рабочего) слоя формы, К;

$T_2(\tau)$  – температура среднего слоя формы, К;

$T_3(\tau)$  – температура внешнего слоя формы, К;

$T_4(\tau)$  – температура отливки, К;

$P_1(\tau)$  – давление газов во внутреннем (рабочем) слое формы, Па;

$P_2(\tau)$  – давление газов в среднем слое формы, Па.

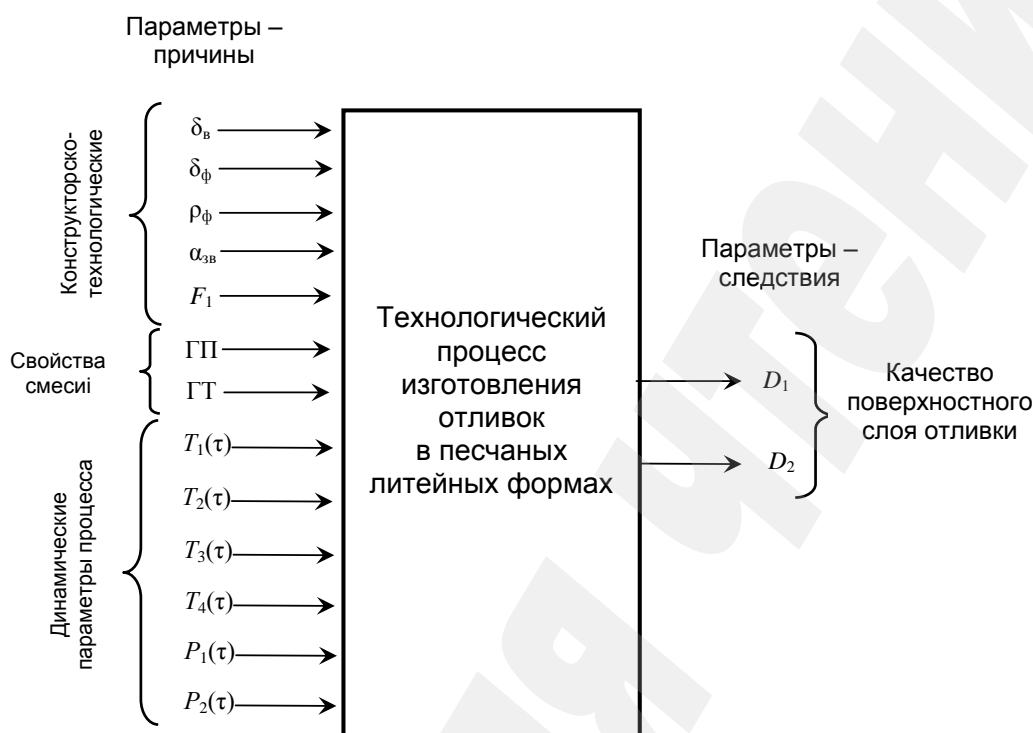
Наконец, к четвертой группе относили параметры – следствия: качество поверхностного слоя отливок. Поверхностный слой готовых отливок оценивали в баллах по двум факторам: пригару и раковинам по 5-балльной шкале для каждого фактора.

В итоге, схема зависимости «параметры процесса – качество отливки» выглядит так, как это представлено на рис. 2, а главная зависимость «измеренные параметры – качество» имеет следующий вид:

$$D_1 = D_1(\delta_6, \delta_\phi, \rho_\phi, \alpha_{зв}, F_1, ГП, ГТ, T_1, T_2, T_3, T_4, P_1, P_2), \quad (1)$$

$$D_2 = D_2(\delta_6, \delta_\phi, \rho_\phi, \alpha_{зв}, F_1, ГП, ГТ, T_1, T_2, T_3, T_4, P_1, P_2). \quad (2)$$

Далее обратим внимание на то, что функционал – это отображение, заданное на произвольном множестве и имеющее числовую область значений: обычно множество вещественных чисел – математических объектов, возникающих из потребности измерения геометрических и физических величин [15].



**Рис. 2.** Информационная схема зависимостей «параметры-причины – параметры-следствия» (параметры процесса – параметры качества)

Исходя из этого, объединим все перечисленные «параметры-причины» в безразмерные промежуточные функционалы: технологический, температурные и гидравлический.

*Технологический* безразмерный промежуточный функционал:

$$K_M = \frac{ГТ \cdot \rho_\phi \cdot \delta_{зв} \cdot F_1 \cdot \delta_v}{ГП \cdot P \cdot \delta_\phi} \quad (3)$$

*Температурные* промежуточные функционалы, безразмерные температуры:

$$K_{T_1} = \frac{T_1}{T_4}; K_{T_2} = \frac{T_2}{T_4}; K_{T_3} = \frac{T_3}{T_4} \quad (4)$$

*Гидравлический* промежуточный функционал, безразмерное давление:

$$K_G = \frac{P_1}{P_2} \quad (5)$$

И, наконец, создадим общий итоговый функционал, который назовем

«газоотводностью» в системе «отливка – литейная форма»:

$$ГВ = \frac{K_{T_1} \cdot K_{T_2} \cdot K_{T_3}}{K_{Г} \cdot K_{М}}, \quad [б/р]. \quad (6)$$

Таким образом, получим *новый комплексный безразмерный параметр «газоотводность» и метод его измерения*. Этот метод, безусловно, относится к опосредованному измерению, то есть к такому, результат которого получается путем объединения многих прямых измерений [16].

Поскольку составляющими такого измерения является динамические параметры, этот функционал тоже относится к динамическим. Математическими приемами (например, интегрированием или усреднением) его можно свести к статическому среднему значению, т. е. к единому безразмерному числу.

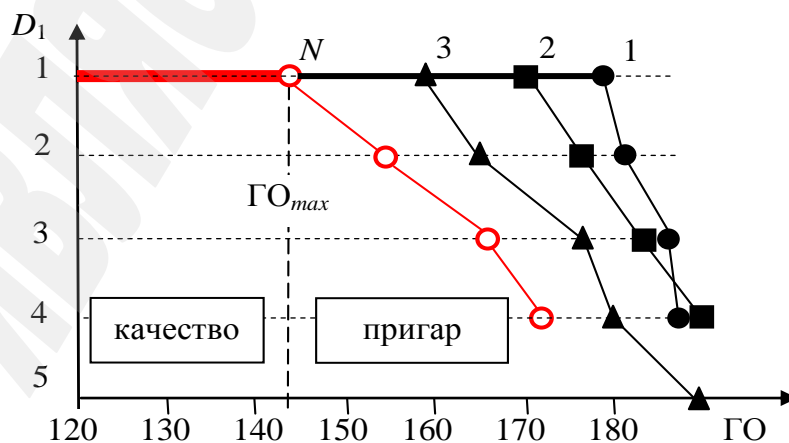
## 6. Результаты исследования

### 6.1. Разработка и анализ комплексного параметра-функционала «газоотводность» в системе «отливка – литейная форма»

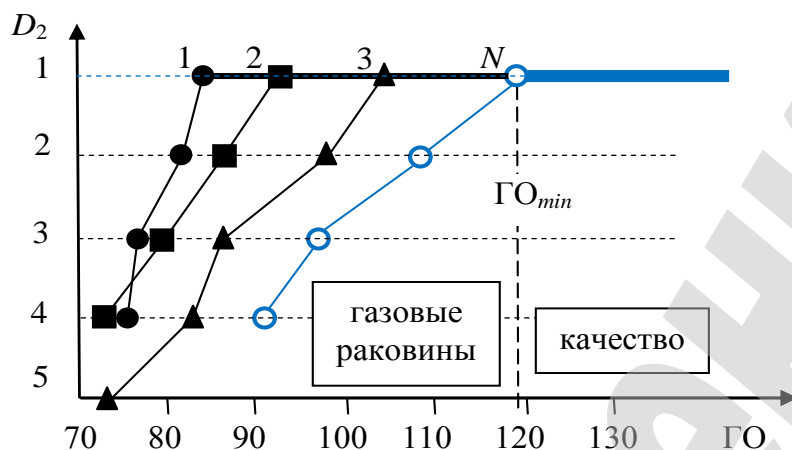
Для анализа нового комплексного параметра «газоотводность» в системе «отливка – литейная форма» необходимо было экспериментально получить реальный вид зависимостей (1) и (2).

Для этого был разработан и создан лабораторный измерительный комплекс, позволяющий в рамках одного эксперимента предварительно выбирать соответствующие методы [17] и измерять газопроницаемость и газотворность формовочной смеси. Затем сделать из последней тестовую литейную форму и выполнить по разработанному плану серию экспериментов по изготовлению отливки с измерением динамических параметров системы во время его охлаждения. После этого измеряли качество поверхности отливок ( $D_1$  по пригару [18] и  $D_2$  по газовым раковинам [19]) по пятибалльной системе.

Эксперименты выполняли в соответствии с разработанным планом. Их результаты представлены на рис. 3, 4.

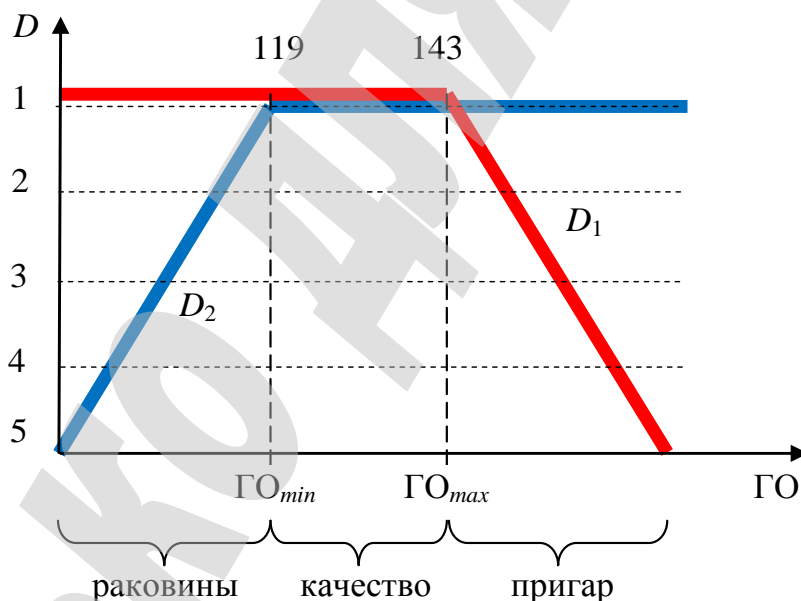


**Рис. 3.** Зависимость итогового качества поверхности стальной отливки по пригару ( $D_1$ ) от газоотводности (ГО) в системе «отливка – литейная форма» во время остывания отливки: 1, 2, ..., N – номер эксперимента



**Рис. 4.** Зависимость итогового качества поверхности стальной отливки по газовым раковинам ( $D_2$ ) от газоотводности (ГО) в системе «отливка – литейная форма» во время остывания отливки: 1, 2, ...,  $N$  – номер эксперимента

Если в этих экспериментах  $ГО_{min} < ГО_{max}$ , то, объединяя графики, представленные на рис. 3, 4, получаем итоговый минимаксных график с гарантированной зоной качества поверхности отливки (рис. 5). В рамках данного графика с определенной достоверностью должен сбываться прогноз годности отливки по критерию газоотводности ГО.



**Рис. 5.** Зависимость прогноза итогового общего качества поверхности стальной отливки от газоотводности системы «отливка – литейная форма»:

— по пригару; — по газовым раковинам

Для условий эксперимента (стальная отливка толщиной 20 мм, полученная в песчано-смоляных формах толщиной 50 мм и с содержанием связующего 5 %, температура заливки 1700 °С)  $ГО_{min}=119$ ,  $ГО_{max}=143$ . Таким образом, предложен новый критерий бездефектности литья: функционал «газоотводность» и показаны пределы его значений, обеспечивающие качество стальных отливок при литье в песчано-смоляные формы.

## 6.2. Оценка точности и достоверности использования комплексного параметра в качестве критерия бездефектности литья

Применение описанного метода для каждого отдельного вида и способа литья возможно только после тщательной оценки его точности и достоверности [20]. Для оценки точности будем пользоваться соображениями, которые проиллюстрируют следующий пример для двух измерений. Пусть некоторый функционал  $K$  образуется путем умножения двух частных параметров  $P$  и  $Q$ , измеряемых непосредственно прямым методом с погрешностями, соответственно:

$$P \pm \delta_p; Q \pm \delta_q.$$

Обозначим погрешность определения функционала  $K$  через  $\Delta$ , тогда можно записать диапазон его значений таким образом:

$$K \pm \Delta.$$

Поскольку  $K=PQ$  по определению, оценим верхнюю границу значения  $K$  при максимальной ошибке:

$$K + \Delta = (P + \delta_p)(Q + \delta_q) = PQ + Q\delta_p + P\delta_q + \delta_p\delta_q, \quad (6)$$

или

$$\Delta_+ = Q\delta_p + P\delta_q + \delta_p\delta_q. \quad (7)$$

Выражение  $\delta_p\delta_q$  более низкого порядка малости, чем другие слагаемые в (7), поэтому ими можно пренебречь:

$$\Delta_+ \sim Q\delta_p + P\delta_q. \quad (8)$$

Соответственно, оценим нижнюю границу значения  $K$  при максимальной ошибке:

$$\Delta_- \sim -Q\delta_p - P\delta_q. \quad (9)$$

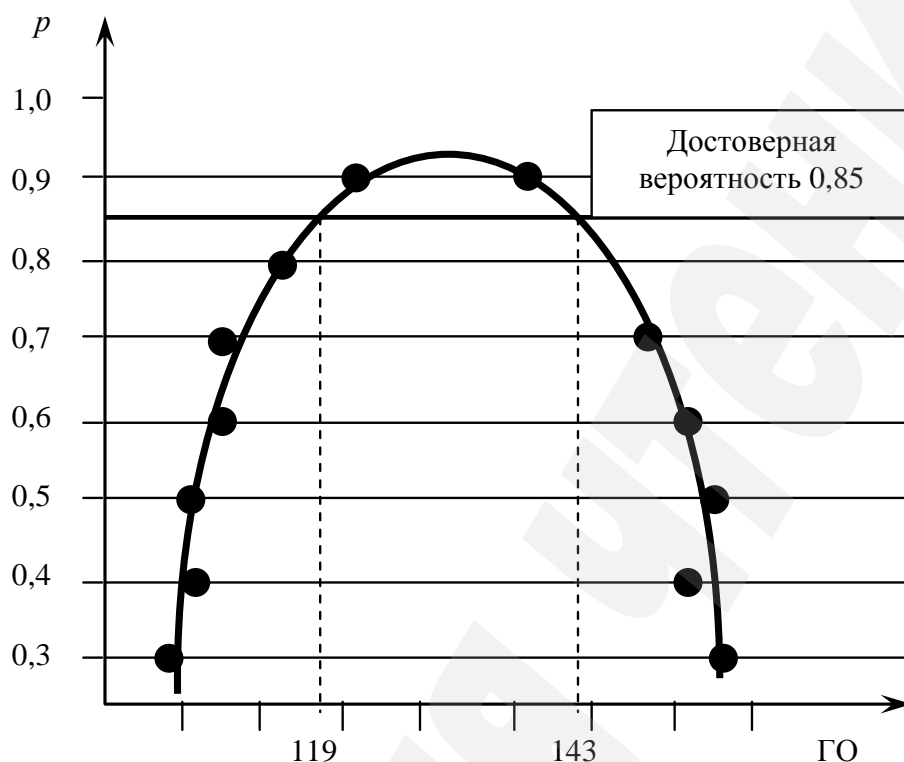
Оценка точности, выполненная предложенным методом, показала, что ошибка измерения функционала «газоотводность» в описанных выше условиях стального литья в песчано-смоляные формы не превышает 8 %, что вполне приемлемо для такого вида технических приложений.

Для оценки достоверности метода были внесены изменения в начальный план эксперимента. В предыдущих исследованиях эксперименты делали по одному разу для различного набора параметров процесса (рис. 3, 4). Для получения статистической достоверности прогноза качества поверхности отливок количество наборов было уменьшено, но эксперименты для каждого конкретного набора выполняли по 10 раз.

В результате получена экспериментальная зависимость вероятности



получения качественной отливки от значения ГО для этой группы однотипных экспериментов (рис. 6).



**Рис. 6.** Статистическая достоверность использования функционала газоотводности в качестве критерия качества стального отливки, полученной в песчано-смоляной форме

Из рис. 6 следует, что использование в качестве критериальных границ значений  $ГО_{\min}=119$  и  $ГО_{\max}=143$  с вероятностью не менее 0,85 достоверно гарантирует высокое качество поверхности отливки и по отсутствию пригара, и по отсутствию газовых раковин.

### 6.3. Практическое использование результатов исследования с оценкой их технико-экономических преимуществ перед известными методами

В Бердичевском АО «Прогресс» (Украина) были проведены испытания системы комплексного измерения эффективных параметров переноса через гетерогенные среды. Объектом исследования были выбраны песчано-глинистые и песчано-смоляные смеси, которые используются в качестве формовочных материалов при изготовлении литейных форм для стального литья. В результате испытаний установлено, что применение этой системы позволило достичь следующих технических результатов.

По методам и средствам измерения:

- подтверждена эффективность метода измерения физических и технологических параметров системы «отливка – форма» в различных точках пространства-времени существования отливки и литейной формы с последующей сверткой их значений к единому числу – функционалу газоотводности;
- оценены достоверность и точность измерения первичных и итоговых

параметров литья в лабораторных и производственных условиях литейного цеха Бердичевского АО «Прогресс»;

– подтверждена эффективность использования единого функционала в качестве критерия качества процессов литья в песчаные литейные формы.

По качеству результатов литейного производства:

– количество бракованных стальных отливок, вызванных поверхностными дефектами: пригаром и газовыми раковинами, уменьшилось в среднем на 31,1 % от общего процента бракованного литья.

## **7. SWOT-анализ результатов исследования**

*Strengths.* Главным положительным влиянием объекта исследования на свои внутренние факторы является созданная им возможность на начальных этапах техпроцесса прогнозировать качество будущих отливок. Это позволяет экономить значительные энергетические, материальные и трудовые ресурсы.

*Weaknesses.* Главным негативным воздействием объекта исследования на свои внутренние факторы является необходимость оснащать весьма «жесткие» условия литейного производства весьма «тонкими» и сложными в обслуживании измерительными приборами.

*Opportunities.* Перспективы дальнейших исследований в этом направлении связаны как с развитием теоретической базы, так и с совершенствованием методов и средств повышения качества проектирования и эффективности управления литейным производством за счет создания новых информационных технологий и метрологической базы в процессах литья.

Объект исследования позволяет заранее предотвратить появление бракованных отливок на ранней стадии жизненного цикла литых деталей. При этом не только увеличивается процент выхода годного в литейном производстве, но и значительно снижается непроизводительный расход его ресурсов.

*Threats.* Как и в любом объекте литейного производства, угрозы его «деятельности» являются продолжением его основных свойств: высокоинтенсивности, многофакторности и быстротекучести литейных процессов, серьезно влияющих на точность и достоверность предложенных методов. При этом имплементация предлагаемого метода практически не приведет к дополнительным затратам литейного предприятия. Она основана на применении простых измерительных приборов и несложного программного обеспечения для информационной обработки результатов измерений.

Полных аналогов предлагаемого комплексного метода измерения не существует. Ранее измеряли лишь отдельные параметры системы «отливка – форма».

## **8. Выводы**

1. Разработан параметр-функционал «газоотводность» в системе «отливка – литейная форма» и выполнен его анализ. Предложен новый критерий бездефектности литья: функционал «газоотводность» и показаны пределы его значений, обеспечивающие качество стальных отливок при литье в песчано-смоляные формы.

2. Оценена точность и достоверность использования комплексного

параметра-функционала в качестве критерия бездефектности литья. Оценка точности и достоверности, выполненная предложенным методом, показала, что ошибка измерения функционала «газоотводность» в описанных выше условиях стального литья в песчано-смоляные формы не превышает 8 %. Это вполне приемлемо для такого вида технических приложений, а также с вероятностью не менее 0,85 достоверно гарантирует высокое качество поверхности отливки и по отсутствию пригара, и по отсутствию газовых раковин.

3. Осуществлено практическое внедрение результатов исследования с оценкой их технико-экономических преимуществ перед известными методами. В результате внедрения установлено, что применение этой системы позволило снизить количество бракованных стальных отливок, вызванных поверхностными дефектами на 31,1 % от общего процента бракованного литья.

### Литература

1. Baranov, V. V. Tehnologicheskii audit predpriatiia v semi shagah [Electronic resource] / V. V. Baranov // NP TsDO «ELITARIUM». – Available at: \www/URL: [http://www.elitarium.ru/tehnologicheskijj\\_audit\\_predpriyatija/](http://www.elitarium.ru/tehnologicheskijj_audit_predpriyatija/). – 03.05.2016.
2. Dulnev, G. N. Protsessy perenosa v neodnorodnyh sredah [Text] / G. N. Dulnev, V. V. Novikov. – Moscow: Energoatomizdat, 1991. – 248 p.
3. Dulnev, G. N. Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov [Text] / G. N. Dulnev, Yu. P. Zarichniak. – Leningrad: Energiia, 1974. – 264 p.
4. Types of experiments [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://psc.dss.ucdavis.edu/sommerb/sommerdemo/experiment/types.htm>. – 25.12.2014.
5. Oborsky, G. A. Izmerenie parametrov vnutrennih teplovykh protsessov po infrakrasnym videopotokam ot poverhnosti detali [Text] / G. A. Oborsky, V. M. Riazantsev, Yu. V. Shihireva // Modern technologies in mechanical engineering. – 2013. – Vol. 8. – P. 124–132.
6. Stanovsky, P. Automated monitoring of the flow of technological processes with low-frequency streams [Text] / P. Stanovsky, L. Bovnegra, Yu. Shihireva // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. – 2012. – Vol. 25, Part II. – P. 70–74.
7. Jou, D. Extended Irreversible Thermodynamics [Text] / D. Jou, J. Casas-Vázquez, G. Lebon. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. – 321 p. doi:[10.1007/978-3-642-97430-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-97430-4)
8. Cui, X. Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications [Text] / X. Cui, A. M. M. Bustin, R. M. Bustin // Geofluids. – 2009. – Vol. 9, No. 3. – P. 208–223. doi:[10.1111/j.1468-8123.2009.00244.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2009.00244.x)
9. Prokopovich, I. Metrological assurance of control density heterogeneous materials [Text] / I. Prokopovich, M. Duhanina, I. Stanovska, H. Walid Sher, V. Dobrovolska, O. Toropenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mechanical-technological systems and complexes. – 2016. – No. 50 (1222). – P. 22–28.

10. Oborsky, G. The express method of bimetallic castings defects measurement with the use of vortex-current effect [Text] / G. Oborsky, A. Stanovskyi, I. Prokopovich, O. Shmaraiev, M. Dukhanina // ScienceRise. – 2016. – Vol. 5, No. 2 (22). – P. 70–76. doi:[10.15587/2313-8416.2016.69150](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69150)
11. Lysenko, T. V. Application of structural identifiers in foundry manufacture [Text] / T. V. Lysenko, I. V. Prokopovich, A. A. Korjachenko // High technologies of machine-building. – 2011. – Vol. 1 (21). – P. 185–190.
12. Prokopovich, I. V. Systema yntellektualnoho monytorynha protsessa lytia [Text] / I. V. Prokopovich, A. A. Koriachenko, I. I. Stanovska // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury. – 2011. – Vol. 44. – P. 278–282.
13. Ivanov, V. N. Slovar-spravochnik po liteinomu proizvodstvu [Text] / V. N. Ivanov. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 384 p.
14. Tonkonohyi, V. M. Metody vymiriuvannia efektyvnykh znachen parametriv perenosu v mashynobudivnykh detaliakh iz heterohennykh materialiv [Text] / V. M. Tonkonohyi, I. V. Prokopovich, M. O. Dukhanina, V. V. Dobrovolska // Modern technologies in mechanical engineering. – 2017. – Vol. 12. – P. 126–134.
15. Hazewinkel, M. Encyclopaedia of Mathematics [Text] / ed. by M. Hazewinkel. – Netherlands: Springer, 2000. – 631 p. doi:[10.1007/978-94-015-1279-4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-1279-4)
16. Oborsky, G. O. Vymiriuvannia fizychnykh velychyn [Text] / G. O. Oborsky, P. T. Slobodianyk, V. L. Kostenko, S. H. Antoshchuk. – Odesa: Astroprynt, 2012. – 400 p.
17. Oborsky, G. Selection of metrological support of management of complex foundry objects with hardly measurable parameters [Text] / G. Oborsky, A. Stanovskyi, I. Prokopovich, M. Dukhanina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – Vol. 6, No. 3 (72). – P. 41–47. doi:[10.15587/1729-4061.2014.32420](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.32420)
18. Brooks, B. E. Prediction of burn-on and mould penetration in steel casting using simulation [Text] / B. E. Brooks, C. Beckermann, V. L. Richards // International Journal of Cast Metals Research. – 2007. – Vol. 20, No. 4. – P. 177–190. doi:[10.1179/136404607x256006](https://doi.org/10.1179/136404607x256006)
19. Ramana Rao, T. V. Metal Casting: Principles and Practice [Text] / T. V. Ramana Rao. – New Age International, 2007. – 304 p.
20. Trajkovic, G. Measurement: Accuracy and Precision, Reliability and Validity [Text] / G. Trajkovic // Encyclopedia of Public Health. – Netherlands: Springer, 2008. – P. 888–892. doi:[10.1007/978-1-4020-5614-7\\_2081](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7_2081)