

УДК 004.942, 621.746.6.001.2

В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Селівьорстова

**РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НА РОЗПЛАВ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ**

Приведено описание общей методики определения технологических параметров для реализации газодинамического воздействия при производстве отливок и слитков, а также схемы расчета динамики изменения газового давления. Представлены применяющиеся оригинальные и известные расчетные схемы и программные продукты.

Ключевые слова: технологические параметры, расчет, затвердевание, герметизация, температурное поле, моделирование, режим газодинамического воздействия, компьютерная программа.

Приведений опис загальної методики визначення технологічних параметрів для реалізації газодинамічного впливу при виробництві виливків і зливків, а також схеми розрахунку динаміки зміни газового тиску. Представлені оригінальні та відомі розрахункові схеми і програмні продукти, що були використані.

Ключові слова: технологічні параметри, розрахунок, затвердіння, герметизація, температурне поле, моделювання, режим газодинамічного впливу, комп'ютерна програма.

The article describes General methods for determining the technological parameters for the implementation of gas-dynamic influence in the production of castings and ingots, as well as the scheme for calculating the dynamics of change in gas pressure. Used presents an original and well-known calculation schemes and software products.

Keywords: technological parameters, calculation, solidification, sealing, temperature field, modeling, mode of gas-dynamic influence, computer application.

Вступ. Одним із шляхів підвищення якості литого металу є використання тиску в процесі кристалізації. Відомо, що найбільш ефективною є передача наростаючого тиску в двофазну зону, особливо наприкінці періоду твердіння. При існуючих способах такого лиття більша частина навантажень, пов'язаних з використовуваним тиском, реалізується за рахунок міцності ливарної форми, або ємності, в якій вона знаходиться, що суттєво обмежує можливий діапазон тиску та масу виливків. Вказані особливості враховані в розробленому на кафедрі ливарного виробництва Національної металургійної академії України технологічному процесі, що забезпечує газовий тиск на розплав всередині вилівка до повного його затвердіння, зокрема, за умов самогерметизації металу в ливарній формі.

Аналіз попередніх публікацій. Розроблений спосіб лиття може застосовуватися для різних сплавів та ливарних форм [1-5] при використанні відповідних конструкцій пристроїв для його реалізації [6, 7]. При здійсненні технології газодинамічний вплив на розплав всередині вилівка розпочинається після утворення на його поверхні шару

затверділого металу такої товщини, яка взмозі витримати газовий тиск, що передається через спеціальний пристрій після герметизації системи «виливок-пристрій для введення газу» в ливарній формі. Динаміка зміни тиску в системі «виливок-пристрій для введення газу» визначається динамікою зміни міцнісних властивостей шару затверділого металу, яка збільшується від поверхні вилівка [8]. За можливий максимальний рівень тиску газу (МПа) в певний момент часу може бути прийняте значення, близьке значенням тимчасового опору (σ_B) затверділого шару з відповідною температурою [9, 10] та з урахуванням розтягуючих напружень, що виникають у твердій скоринці, які залежать від конфігурації і розмірів вилівка. При цьому напруги в зростаючій скоринці протягом всього процесу затвердіння підтримуються, практично, на рівні найбільшого навантаження, що передуює руйнуванню. Даний варіант реалізації технології застосовний в умовах металевої форми і дозволяє домогтися максимального результату з точки зору якості литого металу (насамперед, механічних властивостей), проте призводить до деформації вилівка із-за наявності у сплаву відносного подовження. За умови стабільності геометричних розмірів вилівка, що твердіє в кокіль або в разовій піщаній формі, в якості параметра, необхідного для розрахунку динаміки наростання тиску в системі «виливок-пристрій для введення газу», використовується опір деформації матеріалу вилівка (σ) в діапазоні робочих температур.

При визначенні технологічних параметрів процесу треба зробити вибір необхідних конструктивних параметрів герметизуючого холодильника, а також, у разі використання комбінованого холодильника, – матеріалу і розмірів теплоізоляційної вставки, встановити основні температурні та часові параметри герметизації системи вилівка-пристрій для введення газу з урахуванням зміни маси та розмірів вилівка і ливарної форми [11 - 14], а також розрахувати режим здійснення газодинамічного впливу [15, 16]. Реалізація вищенаведених процедур на практиці потребує використання спеціально розроблених методик, розрахункових схем та програмного забезпечення, систематизований огляд яких представляється актуальним завданням.

Метою роботи є представлення комплексу програмно-інформаційного розрахункового забезпечення технології газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі.

Основний матеріал. Для розрахунку технологічних параметрів розробленого процесу застосовували відомі та оригінальні розрахункові схеми і інформаційні технології (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема, що ілюструє загальну методику визначення технологічних параметрів на прикладі сталевого виливка

Програмний модуль «SBHeat», що розроблений для розрахунку температурних полів виливка і ливарної форми по методу Стефана-Шварца, має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і може використовуватися в середовищі Windows. Проведене тестування модуля показало перспективність використання даного програмного продукту при визначенні раціональних технологічних режимів здійснення процесів лиття [17, 18].

Розроблений програмний комплекс (ПК) «ASIprints» забезпечує: проведення попередньої обробки зображення сірчаного відбитку шляхом перекладу з напівтонового в монохромне відповідно до заданого порогу бінаризації; визначення включень, які належать до певного діапазону і заливаються відповідним кольором відповідно до заданих діапазонів розмірів; отримання статистичних даних що до кількості включень певного розміру, причому розмір включень приводиться в пікселях і квадратних міліметрах [19, 21].

Встановлення термочасових параметрів герметизації виливка в ливарній формі є необхідною передумовою реалізації газодинамічного

впливу. Визначити час формування герметизуючого шару металу можна за допомогою експериментальних термоелектричних досліджень, систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів (СКМ ЛП) та інженерних методів розрахунку температурного поля виливка [18].

Проведене порівняння результатів розрахунку процесу твердіння в об'ємній піщаній формі кулі та циліндра діаметром 200 мм, а також плити товщиною 200 мм з вуглецевої сталі та алюмінієвого евтектичного сплаву методом скінчених елементів і інженерним методом Стефана-Шварца. Значення максимального відносного відхилення розподілів температур (1), що отримані за результатами розрахунків різними методами (табл. 1), дають можливість обгрунтованого використання аналітичного рішення Стефана-Шварца для побудови температурного поля виливка [22].

$$\Delta = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{|T_{i1} - T_{i2}|}{(T_{i1} + T_{i2})/2} 100\% \right\} \quad (1)$$

де T_{i1} – значення температури в i -тій точці, отримане із застосуванням інженерного розрахунку Стефана-Шварца за допомогою програмного модуля «SBHeat», T_{i2} – значення температури в i -тій точці, отримане із застосуванням СКМ ЛП «Полігон».

Таблиця 1

Порівняння результатів розрахунків твердіння виливків різної конфігурації інженерним методом і методом скінчених елементів

Матеріал виливка	Максимальне відносне відхилення (%) ізохрон при затвердінні часток приведеної товщини виливка								Відхилення часу затвердіння, %
	для виливка, х/Х				для форми, х/Х				
	0,1	0,5	0,9	1	0,1	0,5	0,9	1	
Куля									
Алюмінієвий сплав	0,8	0,6	0,2	0,8	10,2	40,7	41,4	41,6	1,6
Вуглецева сталь	0,2	0,9	1,5	1,9	13,8	45,8	45,9	46,3	0,5
Циліндр									
Алюмінієвий сплав	1,1	0,5	0,2	0,1	26,2	34,8	34,9	34,8	1,9
Вуглецева сталь	0,2	0,7	0,7	0,9	5,5	41,2	40,9	41,6	2,6
Плита									
Алюмінієвий сплав	0,8	0,5	0,3	0,2	9,4	1,3	0,8	0,8	1,8
Вуглецева сталь	1,9	0,3	0,2	0,2	17,1	2,9	0,9	0,7	1,4

При литті в кокіль традиційна постановка задачі Стефана-Шварца не застосовна, оскільки шар фарби на поверхні форми може бути врахований тільки непрямим чином за рахунок коефіцієнту затвердіння і коефіцієнту акумуляції тепла формою, визначення яких при зміні товщини шару фарби можливе експериментальним шляхом, проте, на практиці, це представляє значні труднощі, що призводить до невиправданого ускладнення розрахунку і необхідності реалізації громіздких алгоритмів. Тому розроблена комбінована розрахункова схема, здійснювана таким чином. У відповідності до методики А.Й. Вейника проводиться розрахунок часу твердіння вилівка в пофарбованому кокілі (2, 6), що дозволяє визначити коефіцієнт затвердіння (10) з урахуванням товщини шару фарби (3). Потім за формулою М.І. Хворінова розраховується коефіцієнт акумуляції тепла формою (11) та проводиться розрахунок температурних полів по методу Стефана-Шварца (12 – 15).

$$\tau_{пер} = \frac{V_1 \rho_L c_L (T_1 - T_L)}{\beta F_1 (T_1 - T'_{2cp})}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{кр}}{\chi_{кр}}, \quad (3)$$

$$T'_{2cp} = \frac{T'_{2n} + T'_{2к}}{2}, \quad (4)$$

$$T'_{2к} = \frac{V_2 \rho_F c_F T'_{2n} + V_1 \rho_L c_L (T_1 - T_L)}{V_2 \rho_F c_F}, \quad (5)$$

$$\tau_{затв} = \frac{V_1 \rho_L (c_{cp} \Delta T_{кр} + L)}{\beta F_1 (T_L - T''_{2cp})}, \quad (6)$$

$$T''_{2cp} = \frac{T'_{2к} + T''_{2к}}{2}, \quad (7)$$

$$T''_{2к} = \frac{V_2 \rho_F T'_{2к} + V_1 \rho_L c_{ef} (T_L - T_S)}{V_2 \rho_F c_F}, \quad (8)$$

$$c_{ef} = c_{cp} + \frac{L}{\Delta T_{кр}}, \quad (9)$$

де $\tau_{пер}$ – час відводу теплоти перегріву, с; β – умовний коефіцієнт тепловідводу від вилівка до форми крізь зазор, $Вт/м^2К$; T'_{2cp} – середнє значення температури по перетину стінки кокілю за даний проміжок часу, $К$; $T'_{2к}$ – середнє значення температури по перетину стінки кокілю в кінці стадії відведення теплоти перегріву розплаву, $К$; $\tau_{затв}$ – час затвердіння вилівка, с; T''_{2cp} – середнє значення температури по перетину стінки кокілю впродовж затвердіння вилівка, $К$; $T''_{2к}$ – середнє значення температури по перетину стінки кокілю в кінці стадії затвердіння вилівка, $К$; c_{ef} – ефективна теплоємність матеріалу вилівка, $Дж/кг К$; L – теплота кристалізації сплаву, $Дж/кг$; $\Delta T_{кр}$ – температурний інтервал кристалізації,

K ; V – об’єм, m^3 ; F – площа поверхні, m^2 ; ρ – щільність, $кг/m^3$. Індеси 1 та 2 означають, що величини відносяться відповідно до виливка або кокілю.

$$K = \frac{x}{\sqrt{\tau_{затв} + \tau_{неп}}}, \quad (10)$$

$$b_F = \frac{K \rho_L (L + c_L (T_1 - T_0))}{1,158 (T_0 - T_{F_0})}, \quad (11)$$

$$T_C = \frac{T_0}{1 + \frac{b_F}{b_S} \operatorname{erf} \left(\frac{K}{2\sqrt{a_S}} \right)} \quad (12)$$

$$T_L = (T_0 + t) - t \frac{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{a_L \tau}} \right)}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{K}{2\sqrt{a_L}} \right)} \quad (13)$$

$$T_S = T_C + (T_0 - T_C) \frac{\operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{a_S \tau}} \right)}{\operatorname{erf} \left(\frac{K}{2\sqrt{a_S}} \right)} \quad (14)$$

$$T_F = T_C - (T_0 - T_{F_0}) \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{a_F \tau}} \right) \quad (15)$$

де K – коефіцієнт затвердіння, $m/c^{0,5}$; T_C – температура в точці зіткнення виливка і форми, K ; a – температуропровідність, m^2/c ; b_F – коефіцієнт акумуляції тепла формою, $Bm c^{0,5}/m^2 K$. Індеси S та L означають, що величини відносяться відповідно до твердої або рідкої частини виливка, F – до форми.

Результати розрахунків часу затвердіння в кокілі фасонного виливка «Опорний наконечник стійки конвеєра» масою 1,1 кг із сплаву АК5М (рис. 2) методом скінчених елементів (МСЕ) і методом Стефана-Шварца, показали необхідність врахування шару ливарної фарби та ефективність розробленої комбінованої схеми (табл. 2).

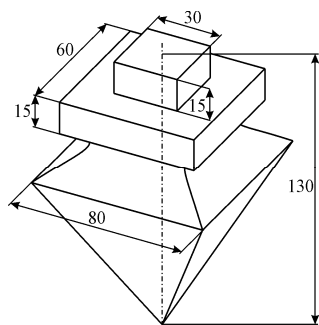


Рисунок 2 – Схема виливка «Опорний»

Таблиця 2

Розрахунковий час затвердіння виливка

Частка приведеної товщини, x/X	Час затвердіння, c		
	по Стефану-Шварцу		МСЕ
	без врахування шару фарби	з врахуванням шару фарби	
0,1	0,3	6,1	7

наконечник стійки конвеєра»	0,3	0,6	13,8	16
	0,5	1,8	38,3	40
	1,0	7,3	153,1	157

Розрахунок режимів газодинамічного впливу включає етапи попередньої обробки і отримання вихідних даних, безпосереднього виконання розрахункового алгоритму і подальшого аналізу результатів (рис. 3) [23, 24].

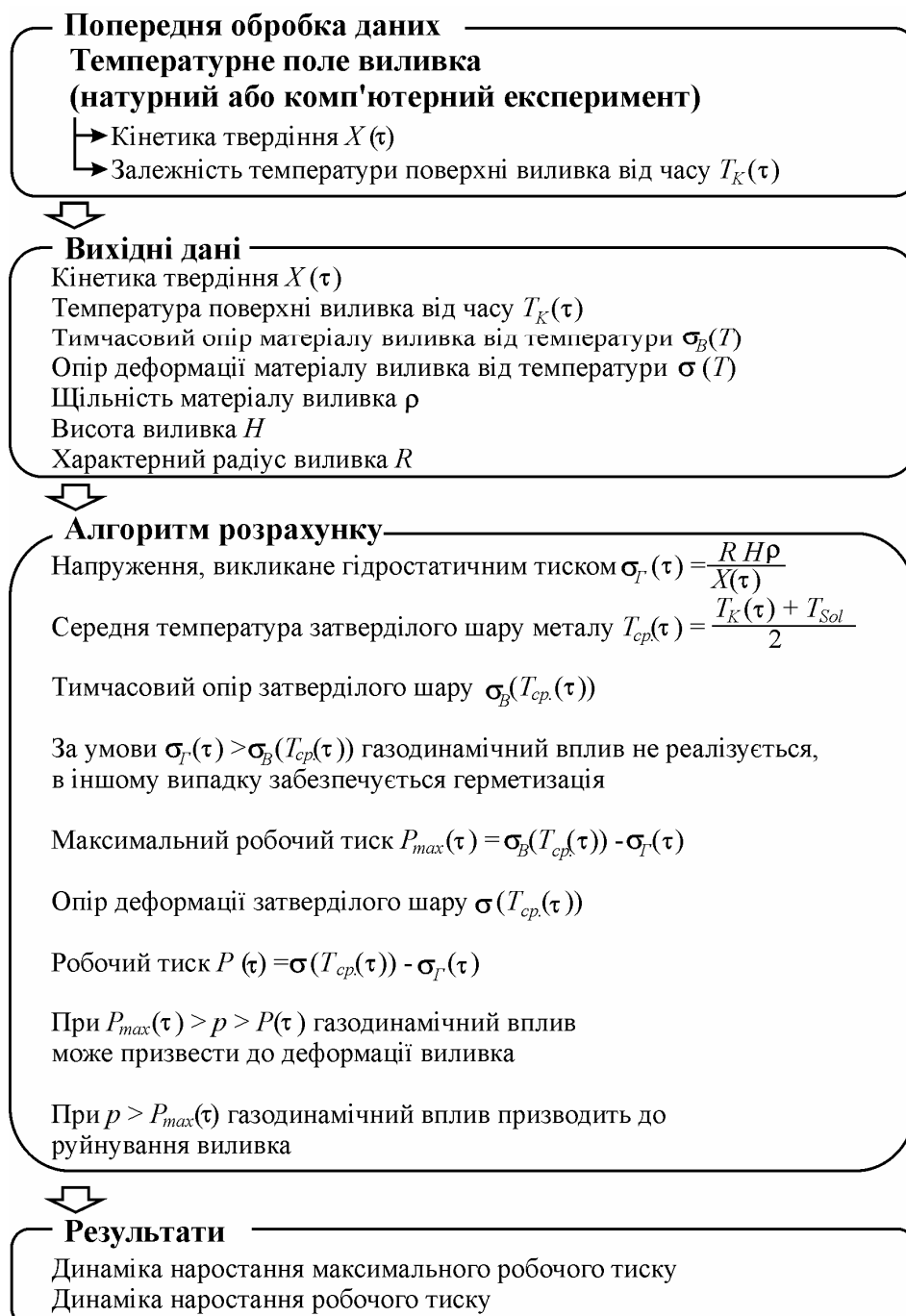


Рисунок 3 – Схема розрахунку режимів газодинамічного впливу

Початковим етапом є попередня обробка даних. Вона полягає у визначенні кінетики твердіння вилівка $X(\tau)$ і зміни температури його поверхні $T_K(\tau)$. Для цього необхідно побудувати температурне поле вилівка на основі результатів термографічних досліджень, або розрахунків. Вихідними даними також є залежності від температури тимчасового опору і опору деформації, а також щільність матеріалу вилівка та його геометричні характеристики (для вилівка циліндричної форми – висота і радіус).

На наступному етапі (алгоритм розрахунку) обчислюють динаміку наростання максимального робочого тиску $P_{\max}(\tau)$ і динаміку наростання робочого тиску $P(\tau)$. В процесі твердіння вилівка змінюється середня температура затверділого шару $T_{cp}(\tau)$, відповідно величини σ_B та σ , що дозволяє розраховувати динаміку зміни робочого тиску. Величина і динаміка зміни максимального робочого тиску розраховувалася як різниця значень тимчасового опору і величини розтягуючих напружень (σ_T) в затверділому шарі металу, відповідно для робочого тиску – це різниця між значеннями опору деформації та величиною розтягуючих напружень.

Для автоматизованого визначення режиму газодинамічного впливу (рис. 4) розроблена комп'ютерна програма «GDICalc» (Gas-Dynamic Influence Calculation) [25].

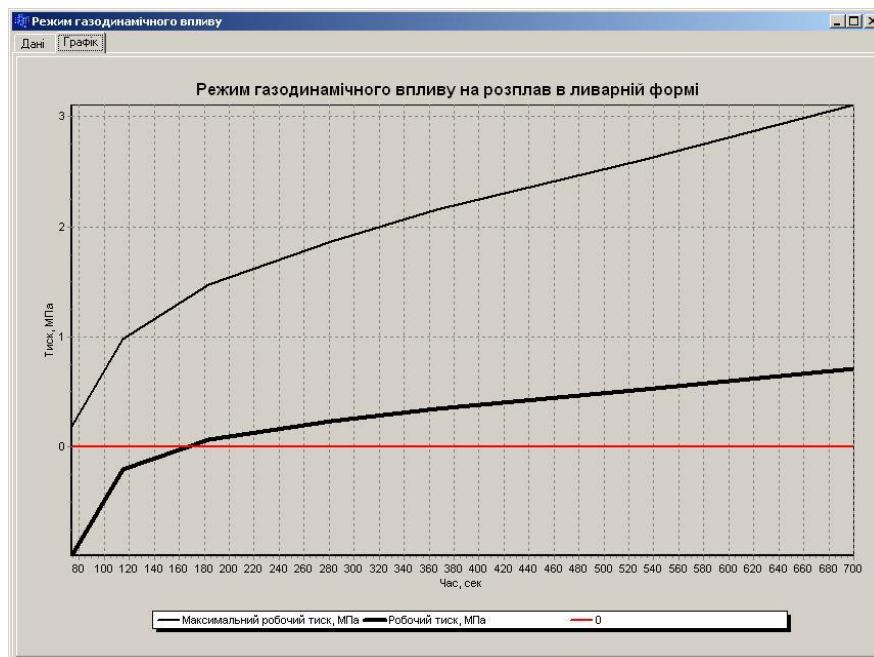


Рисунок 4 – Інтерфейс GDICalc, діалогове вікно «Режим газодинамічного впливу», закладка «Графіки»

Висновки

1. Розроблена методика розрахунку технологічних параметрів газодинамічного впливу на рідку фазу всередині вилівка, заснована на відповідності динаміки підвищення тиску в системі виливків-пристрій для

введення газу кінетиці твердіння виливка. Встановлено, що основним обмеженням діапазону використовуваного тиску є залежність міцністних властивостей матеріалу виливка від температури. Методика дозволяє формалізувати умови здійснення та вибору режимів газодинамічного впливу, і може бути реалізована за допомогою розробленої комп'ютерної програми «GDICalc».

2. Розроблена комбінована схема розрахунку температурних полів виливка, що включає розрахунок часу твердіння виливка в пофарбованому неохолоджуваному кокілі згідно методиці А.Й. Вейника з визначенням коефіцієнту затвердіння, що враховує товщину та теплофізичні властивості шару фарби, а також розрахунок коефіцієнту акумуляції тепла формою згідно формулі М.І. Хворінова та температурних полів по методу Стефана-Шварца. Застосування вдосконаленого аналітичного рішення дозволяє коректно врахувати товщину і теплофізичні властивості ливарної фарби на поверхні неохолоджуваного кокілю при розрахунку часу твердіння виливка.

3. При необхідності диверсифікації способів розрахунку термочасових параметрів герметизації виливка в об'ємній піщаній формі, встановлена можливість обґрунтованого використання аналітичного рішення Стефана-Шварца для побудови температурних полів, зокрема, у вигляді розробленого програмного модуля «SBHeat».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
2. Пат. 28858 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
3. Пат. 37838 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808859; заявл.07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.
4. Пат. 46128 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Куцова В.З., Меньяло О.В., Савєга Д.О. – № u 200906107; заявл.15.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
5. Пат. 55301 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В., Куц П.Д., Савєга Д.О.; власник патенту Національна металургійна академія України – № u 201006702; заявл. 31.05.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
6. Пат. 28859 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
7. Пат. 37837 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808858; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.
8. Селівьорстов В.Ю. Особливості розрахунку газодинамічного впливу на метал, що твердіє в кокілі [Текст] / В.Ю. Селівьорстов // Теорія і практика металургії. – 2009. - № 1-2. – С. 41 – 45.
9. Селиверстов В.Ю. Особенности расчета температурного поля отливки из сплава АК5М, затвердевающей в окрашенном чугунном кокиле [Текст]/

- В.Ю. Селиверстов // Теория и практика металлургии. – 2008. - № 5-6. – С. 32 - 36.
10. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник [Текст] / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин // М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
11. Селиверстов В.Ю. Влияние наружного холодильника на процесс герметизации отливки из стали с широким температурным интервалом затвердевания в кокиле // Теория и практика металлургии. – 2008. - № 3. - С. 32-37.
12. Селиверстов В.Ю. Особенности герметизации отливки из углеродистой стали, затвердевающей в кокиле, при изменении конструкции и размеров наружного холодильника /В.Ю. Селиверстов //Теория и практика металлургии. – 2010. – № 3 – 4. – С. 26 – 30.
13. Селиверстов В.Ю. Влияние конструктивных особенностей и материала наружного холодильника на процесс герметизации в кокиле отливки из штамповой инструментальной стали /В.Ю. Селиверстов //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/5 (46). – С. 42 – 46.
14. Селиверстов В.Ю. Особенности процесса герметизации отливки в форме ЛВМ для осуществления газодинамического воздействия /В.Ю. Селиверстов, П.Д. Куц //Теория и практика металлургии. – 2010. – № 5 – 6. – С. 95 – 98
15. Селиверстов В.Ю. Особливості розрахунку газодинамічного впливу на метал, що твердіє в кокілі // Теорія і практика металургії. – 2009. - № 1-2. – С. 41 - 45.
16. Селиверстов В.Ю. Особенности расчета режима газодинамического воздействия на расплав при кристаллизации отливок из сталей 35Л, Х18Ф1 и алюминиевого сплава АК5М в металлической форме /В.Ю. Селиверстов //Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1 – 2. – С. 64 – 67.
17. Комп'ютерна програма «SBHeat-Інженерний розрахунок температурного поля напівобмеженого вилівка»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 22135 / Михайловська Т.В., Селівьорстов В.Ю.; дата реєстрації 21.09.2007.
18. Михайловская Т.В., Селиверстов В.Ю. Компьютерный расчет температурного поля отливки и объемной песчаной формы для управления технологическими режимами // Вестник СевГТУ: Сб. науч. тр. / МОН Украины. Севастоп. нац. техн. ун-т. Вып 95: Автоматизация процессов и управления – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 47-52.
19. Комп'ютерна програма “ASImprints – Аналіз сірчаних відбитків” Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В. // Свідоцтво на твір № 28879 від 25.05.2009 р.
20. Михайловская Т.В., Селиверстов В.Ю. Компьютерная обработка серных отпечатков темплетов отливок на основе алгоритма рекурсивной заливки // Нові технології. – 2009. - №2. – С. 26 – 30.
21. Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В., Доценко Ю.В., Мушенков Ю.А. Влияние газодинамического воздействия на распределение сульфидных включений в цилиндрической отливке из углеродистой стали, затвердевающей в кокиле // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. - №5. - С. 40 – 43.
22. Селиверстов В.Ю. Инженерный расчет температурного поля отливки для процесса газодинамического воздействия на расплав в литейной форме // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. - №6. - С. 31 – 34.
23. Селиверстов В.Ю. Методика расчета параметров газодинамического воздействия на затвердевающий металл в литейной форме / В.Ю. Селиверстов, Т.В. Михайловская //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 3 (68). – С. 186 – 192.
24. «Методика розрахунку режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю. – № 34833; дата реєстрації 06.09.2010.

25. Комп’ютерна програма «GDICalc»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В. – № 34834; дата реєстрації 06.09.2010.