



The computer methods of calculation of speed distribution of melt elements in a gating system and cast are examined. There are offered energetic measures, based on speed character and its components, for estimation of melt flow in a gating system and choice of variants of metal supply to the mode.

О. И. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, Белорусский национальный технический университет

## О НОВЫХ МЕТОДАХ АНАЛИЗА СКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ РАСПЛАВОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 669.27:519

Проблема выбора литниково-питающих систем является одной из основных при разработке технологического процесса изготовления отливок. Существующие методы [1], основанные на эмпирических подходах, не позволяют выбирать оптимальный вариант конструкций и размеров литниковой системы. Именно эти методы до сих пор используются технологами при выборе размеров литниково-питающих систем для фасонных отливок. Критический анализ методов расчета литниково-питающих систем показывает, что все они базируются на параметрах массы отливки и ее усредненной толщине стенки. В то же время хорошо известно, что практически любая фасонная отливка имеет различную толщину стенок, что приводит к сложному температурному полю, оказывающему влияние на процесс заполнения. Попытка усложнения методов расчета литниковой системы [2] связана с введением дополнительных коэффициентов, которые в общем случае не решают проблему выбора литниковой системы для фасонных отливок. Развитие компьютерных методов расчета течения расплава и его охлаждения, а также появление САЕ-систем открывают новые возможности для выбора мест подвода питателей и размеров литников. Визуализация течения позволяет наблюдать динамику поля скоростей и образования вихрей при течении расплава. В связи с этим возникает необходимость развития новых методов расчета литниковых систем, основанных на учете пространственных распределений полей скоростей в различных элементах литниковой системы и отливки. В настоящей статье предлагаются новые методы расчета характеристик литниковых систем, основанные на компьютерных вычислениях распределений элементов расплава по компонентам скоростей.

Цель настоящей работы — разработка методов оценки динамики течения расплавов и проведения компьютерных расчетов при получении отливок в литниковых системах с разным числом питателей.

В основе методики лежат численные решения уравнений Навье—Стокса для движущейся жидкости [3] и уравнения Фурье—Кирхгофа для описания охлаждения движущегося потока [4]:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \\
 & \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - g, \\
 & \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \\
 & \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho = 0, \\
 & \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c(T)\rho} \left( \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \right) + \frac{F(x, y, z, \tau)}{c(T, x, y, z, \tau)\rho},
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\tau$  — время;  $x, y, z$  — декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально);  $V_x, V_y, V_z$  — проекции скорости жидкости соответственно на координатные оси  $X, Y, Z$ ;  $P(\tau)$  — давление жидкости;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\eta$  — динамическая вязкость;  $g$  — ускорение свободного падения;  $T$  — температура.

Уравнения (1) дополнили следующими начальными и граничными условиями для скоростей и температур  $V_x(x, y, z, 0)=0, V_y(x, y, z, 0)=0, V_z(x, y, z, 0)=0, V(x, y, z, 0)=0, T_p(x, y, z, 0)=700^\circ\text{C}, T_\phi(x, y, z, 0)=20^\circ\text{C}$ , где  $T_p$  — температура расплава;  $T_\phi$  — температура формы. В расчете использовали следующие теплофизические характеристики:  $\lambda=170$  Вт/(м·К),  $\eta=0,0035$  кг/(м·с),  $\rho_0=2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q_{\text{крст}}=365\,000$  Дж/кг,  $T_{\text{сол}}=577^\circ\text{C}, T_{\text{ликв}}=590^\circ\text{C}$ , которые были взяты для сплава АК12Ч (алюминиевый сплав), и теплофизические свойства песчано-глинистой формы:  $\rho_0=1680$  кг/м<sup>3</sup>,  $C=1050$  Дж/(кг·°C),  $\lambda=0,34$  Вт/(м·К).

В качестве объекта исследования была выбрана система "литник—отливка" с четырьмя вариантами подвода металла в форму. На рис. 1 представлены изображения системы "литник—отливка", используемые в расчете.

Для перечисленных вариантов литниковых систем были рассчитаны поля скоростей  $V_x=f(x, y, z, \tau), V_y=f(x, y, z, \tau), V_z=f(x, y, z, \tau)$  и  $V=f(x, y, z, \tau)$ , поля давлений  $P=f(x, y, z, \tau)$  и  $T=f(x, y, z, \tau)$ . На основе анализа изображений течения расплава было выделено три времени процесса заполнения формы. Каждому времени соответствовало определенное физическое состояние расплава. В частности, выбиралось время, соответствующее началу заполнения отливки ( $\tau=1$  с), половине заполнения отливки ( $\tau=1,4$  с) и 95% заполнения отливки ( $\tau=2,2$  с). Для каждого времени течения расплава были сформированы матрицы:

$$\begin{pmatrix} N_{1V_x} & N_{1V_y} & N_{1V_z} \\ N_{2V_x} & N_{2V_y} & N_{2V_z} \\ \dots & \dots & \dots \\ N_{20V_x} & N_{20V_y} & N_{20V_z} \end{pmatrix} \quad (2)$$

где  $N_{iV_x}, N_{iV_y}, N_{iV_z}$  — число элементов расплава, имеющих скорости, лежащие соответственно в интервале  $[V_{i-1, x}, V_{i+1, x}], [V_{i-1, y}, V_{i+1, y}], [V_{i-1, z}, V_{i+1, z}]$ ,  $i$  — число разбиений интервалов  $[V_{\text{min}, x}, V_{\text{max}, x}], [V_{\text{min}, y}, V_{\text{max}, y}], [V_{\text{min}, z}, V_{\text{max}, z}]$ . В данных расчетах  $i = 20$ . Под элементом расплава в настоящей работе понимается элемент разбиения системы "литник—отливка" размером  $\Delta x=3$  мм,  $\Delta y=3$  мм,  $\Delta z=3$  мм. Общее количество элементов системы "литник — отливка — форма" составляет 26 208 клеток. Для каждого варианта литниковой системы была сформирована своя матрица (2), на основе которой вычисляли характеристики относительного импульса потока расплава и его относительную кинетическую энергию, которые в дальнейшем будут обозначены как  $P_x, P_y, P_z, E_x, E_y, E_z$ :

$$P_x = \sum N_{iV_x} V_{ix}, P_y = \sum N_{iV_y} V_{iy}, P_z = \sum N_{iV_z} V_{iz}, \\ E_x = \sum N_{iV_x} V_{ix}^2, E_y = \sum N_{iV_y} V_{iy}^2, E_z = \sum N_{iV_z} V_{iz}^2.$$

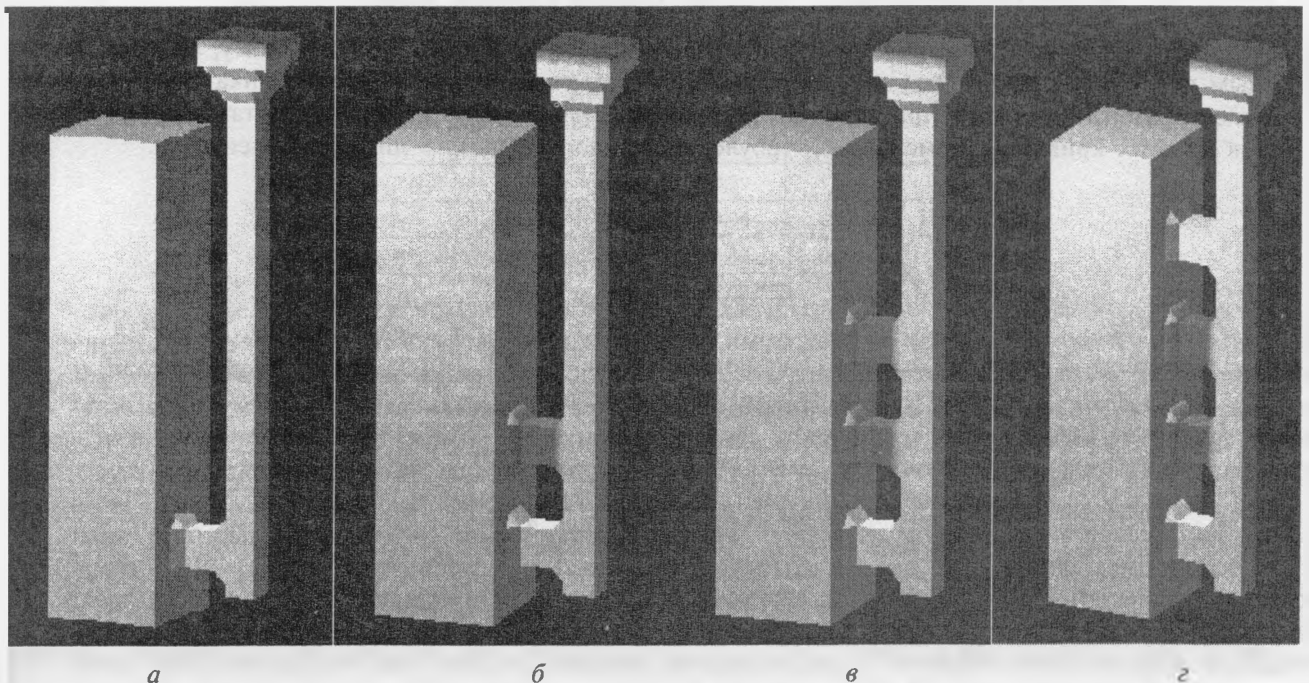


Рис. 1. Изображение входного объекта "литник—отливка" с различным подводом металла: а — один питатель; б — два питателя; в — три питателя; г — четыре питателя

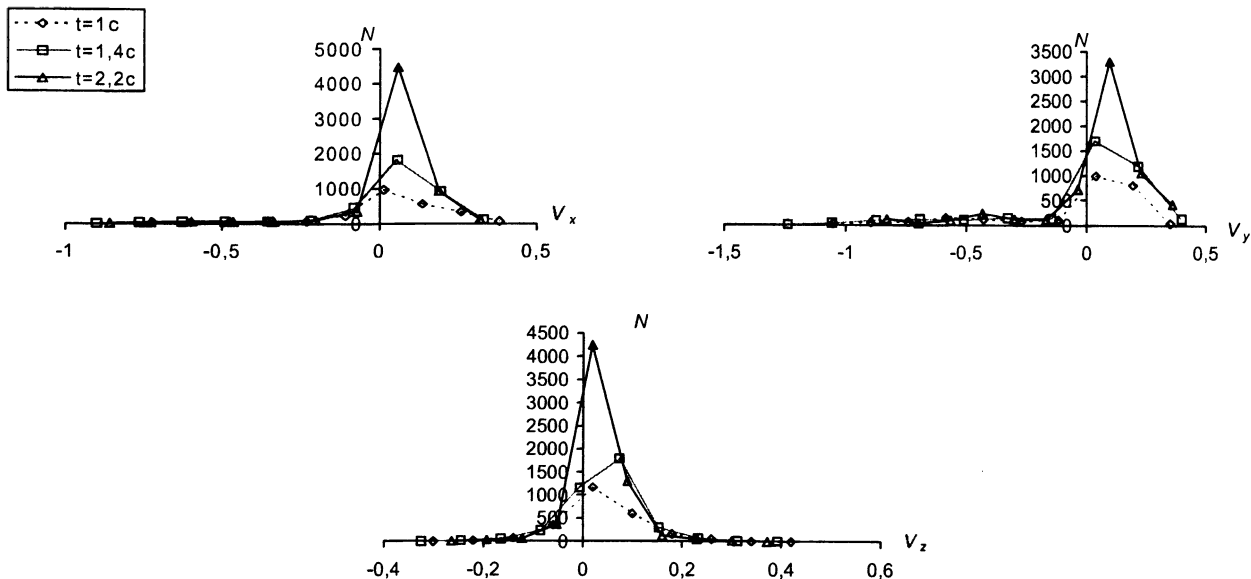


Рис. 2. Распределение числа элементов алюминиевого расплава по составляющим скорости  $V_x, V_y, V_z$  для литниковой системы с одним питателем для различных времен заполнения

На рис.2 показано распределение числа элементов алюминиевого расплава с одним питателем (для систем с двумя, тремя и четырьмя питателями характер распределения аналогичен, но имеются количественные различия в числе элементов расплава, соответствующие каждому интервалу компонент скорости). Из рисунка видно, что для компонент скорости  $V_x, V_y, V_z$  зависимость  $N=f(V_x), N=f(V_y), N=f(V_z), N=f(V)$  носит гауссовый характер, причем в литнике и форме для различных времен заполнения имеется минимальное количество элементов, соответствующих минимальным и максимальным компонентам скорости. С практической точки зрения по этим зависимостям можно проследить, какая доля расплава способна размывать литники и форму. Если скорости по  $V_x, V_y, V_z$  максимальны и доля элементов, имеющих эти скорости, велика, то возможен размыв формы. Асимметрия распределения по  $V_x, V_y, V_z$  свидетельствует о преобладающем влиянии потока расплава в одном из направлений.

На рис. 3, 4 представлены результаты распределения относительной кинетической энергии потока в различных направлениях для системы "литник—отливка" с одним и четырьмя питателями. Как видно из рисунков, зависимость  $NV_i^2 = f(V)$ , где  $i = x, y, z$  носит сложный характер. В частности, в зависимости от числа питателей проявляются два максимума и более, по-видимому, соответствующих разным потокам расплава. Эта характеристика может быть использована как оценка турбулентности в смысле образования вихрей при скрещивании потоков расплава из различных питателей. Чем меньше пиков на этих кривых, тем меньшую турбулентность должна давать литниковая система.

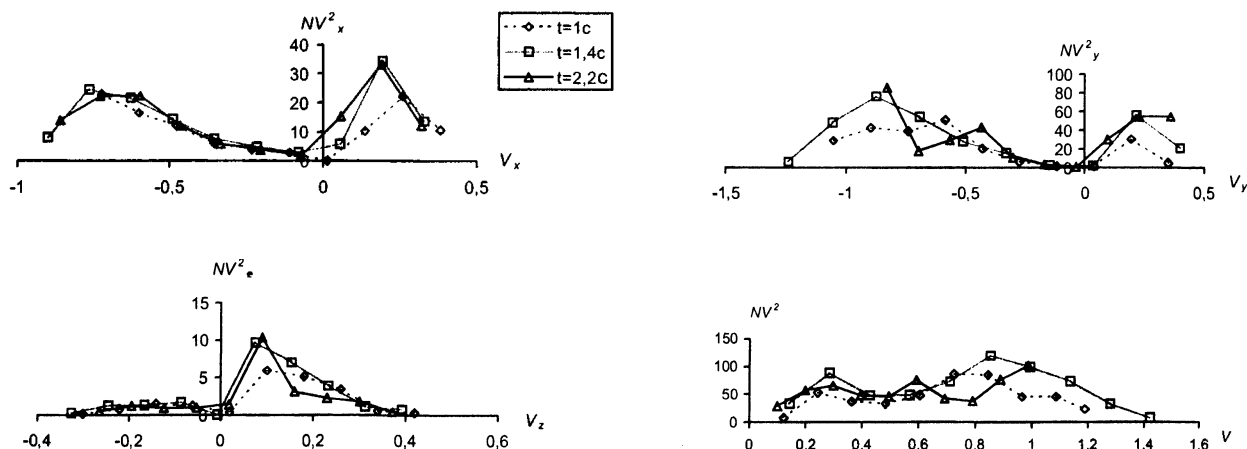


Рис. 3. Распределение относительной кинетической энергии потока алюминиевого расплава по скорости  $V$  и ее составляющим  $V_x, V_y, V_z$  для литниковой системы с одним питателем для различных времен заполнения отливки

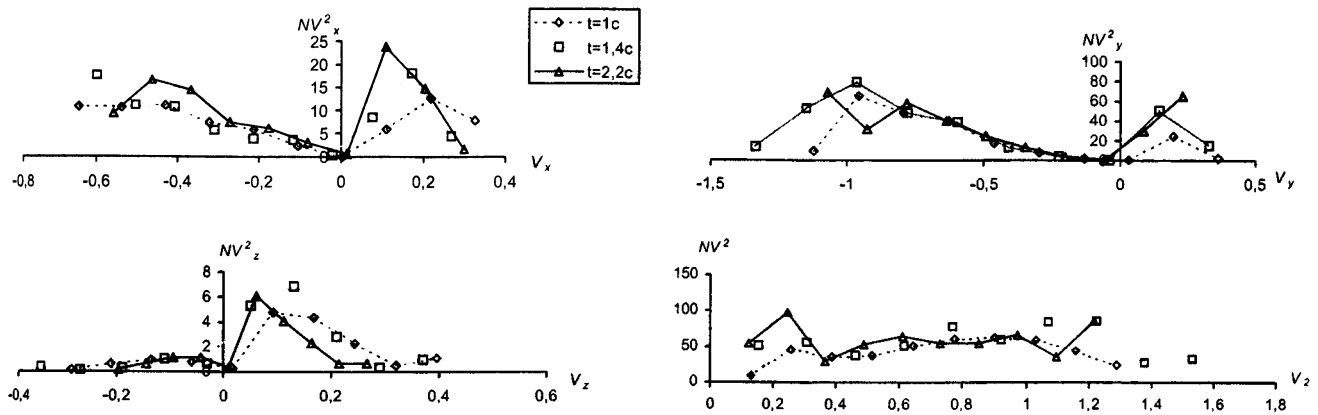


Рис. 4. Распределение относительной кинетической энергии потока алюминиевого расплава по скорости  $V$  и ее составляющим  $V_x, V_y, V_z$  для литниковой системы с четырьмя питателями для различных времен заполнения отливки

Таблица 1. Энергетические характеристики течения расплава в литниковых системах с различным числом питателей ( $K$ ) для различных времен заполнения ( $\tau$ )

$\tau, c$	$K$	$P_x$	$P_y$	$P_z$	$E_x$	$E_y$	$E_z$
1,0	1	57,55	-89,51	91,85	107,79	225,76	19,78
	2	32,97	-130,45	85,82	94,31	250,26	16,69
	3	69,17	-125,09	93,01	104,88	247,32	18,41
	4	2,75	-123,13	85,20	74,63	220,18	15,83
1,4	1	136,13	32,5	157,75	137,88	308,40	27,22
	2	102,22	56,97	178,68	97,19	301,89	25,74
	3	-0,43	51,00	117,74	81,59	278,00	15,27
	4	73,46	68,27	142,20	84,04	317,08	18,79
2,2	1	302,44	343,83	196,14	142,77	328,78	23,07
	2	167,39	417,57	179,11	92,60	382,44	22,18
	3	191,52	327,01	189,60	96,25	335,49	21,31
	4	144,66	272,16	143,25	97,62	337,16	17,17

Таблица 2. Средние скорости в питателях ( $K$ ) при  $\tau = \tau_{\text{заполн}}$ , вычисленные по скоростям элементов питателя (1-й питатель – нижний, 4-й – верхний)

$K$	$\tau_{\text{заполн}}, c$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
		м/с			
1	2,30	0,54	–	–	–
2	2,28	0,24	0,39	–	–
3	2,30	0,10	0,26	0,39	–
4	2,32	0,10	0,13	0,29	0,41

В табл.1 приведены интегральные энергетические характеристики течения расплава в системе с различным числом питателей. Как следует из таблицы, вычисленные характеристики зависят от числа питателей в форме. Эти характеристики также могут быть использованы при сравнении различных литниковых систем. Для исследованных литниковых систем определяются время заполнения и средние скорости в сечениях  $XY$  ( $Z=2$ ) (табл.2). Результаты расчетов показывают возможности получения самой разнообразной информации по скоростям элементов системы "литник—отливка", что позволяет разрабатывать методики оценки эффективности "работы" литниковой системы.

Таким образом, проведенные компьютерные расчеты показали, что литниковые системы можно сравнивать, основываясь на распределении элементов потока расплава по компонентам скоростей. В зависимости от типа питателей эти распределения существенно отличаются для различных промежутков времени, что дает возможность использовать их в качестве характеристик литниково-питающих систем. Они могут быть вычислены для отливок сложной конфигурации, к которым очень сложно подобрать показатель выбора оптимальной литниково-питающей системы. Такой подход является комплексным при оценке литниковой системы и может привести к развитию новых методов расчета литниковых

систем. В качестве критериев оценки движения расплава в форме можно предложить следующее. Во-первых, распределение по компонентам  $V_x, V_y, V_z$  числа элементов расплава для заданных промежутков времени:  $N_{V_x}=f(V_x, \tau)$ ,  $N_{V_y}=f(V_y, \tau)$ ,  $N_{V_z}=f(V_z, \tau)$ . Во-вторых, параметры относительного импульса и относительной кинетической энергии потока во времени  $N_{1x}=\Sigma P_x$ ,  $N_{1y}=\Sigma P_y$ ,  $N_{1z}=\Sigma P_z$ ,  $N_{2x}=\Sigma E_x$ ,  $N_{2y}=\Sigma E_y$ ,  $N_{2z}=\Sigma E_z$ . Задавая дискретность по времени для первой и второй групп параметров, можно получить большое число характеристик системы "литник—отливка", по которой и проводить сравнительный анализ эффективности литниковых систем, используя при этом методы теории распознавания образов.

### Литература

1. Дубицкий Г. М. Литниковые системы. М.: Машгиз., 1962.
2. Галдин Н. Н., Чистяков В. В., Шатунский А. А. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок. М.: Машиностроение, 1992.
3. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 110—114.
4. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Тепловая модель расплав—зародыш и исследование характеристик переходной зоны под влиянием электронного строения 3d-элементов в алюминии // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 4. С. 792—796.



### ТОРГОВОЕ ЧАСТНОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АРТОРГ»

УП «Арторг» реализует со склада в Минске  
металлопрокат в ассортименте.  
Возможна поставка под заказ. Товар сертифицирован.  
Возможность встречных поставок. Гибкая система скидок.  
Лицензия № 13744 от 18.07.2000 г.

Тел./факс: 2505302, 2505602, 2535454 (многоканальный)  
моб. 8-029-6960000