

Структура исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливок и переход к конструированию легковесных отливок

Рассмотрены структура, результаты исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливок. В развитие темы об ускоренном охлаждении и вызванном им упрочнении отливок, а также на основе полученного опыта использования текучести песка как подвижной среды вокруг отливки, выполняются исследования по проектированию легковесных ячеистых отливок как сберегающих металл конструкций. Взаимосвязь работ служит примером поэтапного совершенствования процессов точного литья.

Ключевые слова: охлаждение отливки, песчаная форма, сбережение металла, вакуумная формовка, разовая модель, упрочнение смеси, литье по газифицируемым моделям.

Существенное уменьшение массы литых металлоконструкций является одной из актуальных задач исследований и конструкторских разработок в литейном производстве. Современные литые конструкции, в силу используемых литейных процессов и традиционных условий их конструирования, значительно превышают расчетные служебные показатели, что ведет к перерасходу энергоносителей, шихтовых материалов и трудоемкости литейного производства. Получение легковесных отливок с заданной структурой и свойствами возможно лишь при обеспечении управления интенсивностью теплоотвода в литейной форме. Поскольку в традиционных методах формообразования отливка сопровождается формой (от заливки расплава до полного охлаждения), то способы управления теплоотводом сводятся к изменению теплофизических свойств формы, либо к принудительному охлаждению. Но при варьировании таких свойств и принудительного охлаждения скорость затвердевания и охлаждения отливки из-за образования зазора между отливкой и формой можно изменить в относительно небольших пределах: для формы песчаной – на 10%, из специальных огнеупоров или металлической дроби – на 50%, металлической, в том числе охлаждаемой, – в 2-4 раза.

Если еще учесть, что интенсивность теплоотвода по ходу охлаждения монотонно уменьшается (а условия структурообразования часто требуют циклического или даже знакопеременного теплоотвода), то становится ясно, что в рамках традиционных методов формообразования (объем литья в разовые песчаные формы приближается к 80%) получить отливки с заданными структурой и свойствами весьма затруднительно. Наиболее близки к реализации управления в широком интервале теплоотводом методы, основанные на физических способах упрочнения песчаной формы: разновидности ЛГМ-процесса (литье по газифицируемым моделям), литье в вакуумируемые, магнитные и замороженные формы. Однако ни один из них в отдельности не решает всей

проблемы, и каждый имеет существенные недостатки. Напрашивается необходимость синтезирования различных физических воздействий в процессах формообразования, включая использование таких воздействий в традиционных формах со связующим для создания высокоэффективных методов литья и конструирования легковесных отливок.

Отсюда основные направления исследований процессов формообразования заключаются в изучении механизма упрочнения дисперсных неметаллических материалов, условий формирования качества поверхности отливок, процессов тепломассопереноса в поле сил управляемого физического воздействия, включая создание градиентов прежде всего давления, концентрации и температуры, в том числе криовоздействие, вакуумирование; создание на их основе новых экологически чистых ресурсосберегающих технологий. Сохраняется актуальность внедрения нетоксичных (преимущественно неорганических) связующих и добавок, создание на их основе новых способов формовки и смесеприготовления с учетом огромного опыта упрочнения смеси за счет протекания химических процессов, совершенствование методов регенерации, обезвреживания вредных выбросов. Растет важность расширения сферы компьютеризации при разработке и контроле процессов формовки, конструировании отливок, создании баз данных, систем экспертных оценок, методов оптимизации материалов и технологий, в том числе по одному из главных критериев – снижению металлоемкости отливок.

Для осуществления металлосбережения значительным потенциалом обладают методы формообразования, основанные на физических способах упрочнения песчаной формы, в частности, разновидности ЛГМ-процесса и вакуумно-пленочной формовки (ВПФ) с вакуумированием песчаной формы. В этих методах модель при формовке свободно обтекает сыпучей песчаной смесью (из многократно используемого песка с добавлением до 5% свежего) без воз-

*Работа выполнена под рук. проф. Шинского О. И.

возможности прилипания, в отличие от смесей со связующим. Это позволяет формировать модели практически без уклонов и способствует металлосбережению. По точности отливок эти методы приближаются к литью по выплавляемым моделям.

Если прочность смесей со связующим традиционных песчаных форм определяется физико-химическим механизмом адгезионно-когезионного взаимодействия дисперсной системы, включающей связующее и песок, то в вакуумируемых формах из песка без связующего роль последнего в создании прочности формы выполняет градиент газового давления на границе «литейная полость – песчаная среда формы». Научное представление о механизме сохранения прочности вакуумируемой формы на этапах формообразования и заливки формы расплавом состоит в том, что прочность песчаного наполнителя формы пропорционально зависит от величины разрежения газа в его поровом объеме [1].

Прочность при сжатии σ_b и твердость НВ, а также фильтрационные свойства вакуумируемой формы определяются следующими зависимостями от степени разрежения газа в порах песчаной формы (рис. 1, 2) [2].

Эти графики показывают уникальные по сравнению с традиционными формами со связующим возможности вакуумируемых песчаных форм (без связующего) по управлению прочностью формовочной смеси главным образом путем изменения степени разрежения за счет регулирования величины подводимого к форме вакуума и величины расстояния L от контролируемого объема в форме до вакуумного фильтра опоки, последнее – за счет сопротивления фильтрации формовочной смеси. По этой причине вакуумируемая форма по своей природе обладает дифференцируемыми прочностными характеристиками. А график (рис. 2) показывает глубину распространения постоянно изменяющегося разрежения в толще формы, что свидетельствует о возможности применения достаточно крупных форм, усиления прочности формы подводом к конкретной ее области вакуумного фильтра, повышения давления в полости формы или изменения прочности снижением газопроницаемости формы, например, применением герметизирующей противопопригарной краски и другими способами.

Описанное влияние вакуума на прочность формы традиционно используют на этапах формовки, заливки металла в форму и затвердевания отливки, а после этого вакуум отключают. В работе [3] внедрено системное использование вакуума формы для прокачки жидкого и газообразного хладагента на этапе формирования отливки, начиная с как можно более близкого срока к заливке формы и жидкому состоянию металла с учетом кристаллизации в условиях охлаждения хладагентом при условии взаимодействия металла с формой без какой-либо деформации отливки. А отключение вакуума – разупрочнение песка использовали, как возможность привести его в движение и форсировать теплоотвод благодаря конвекции – переносу теплоты движущейся песчаной средой.

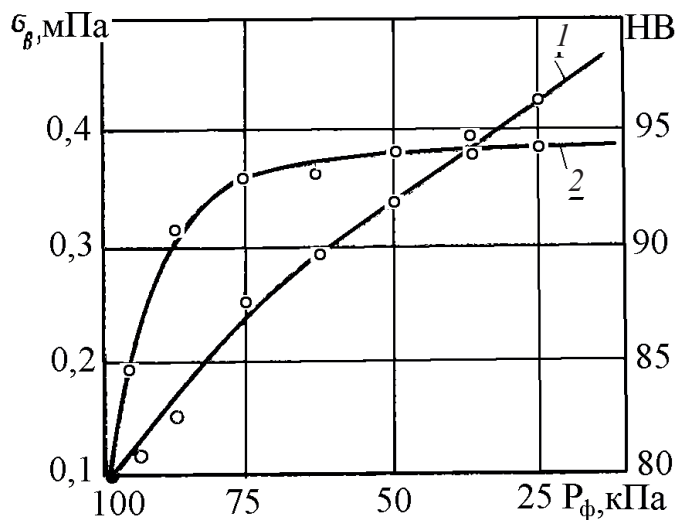


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии σ_b (кр. 1) и твердости НВ (кр. 2) вакуумируемой формы от степени разрежения P_ϕ

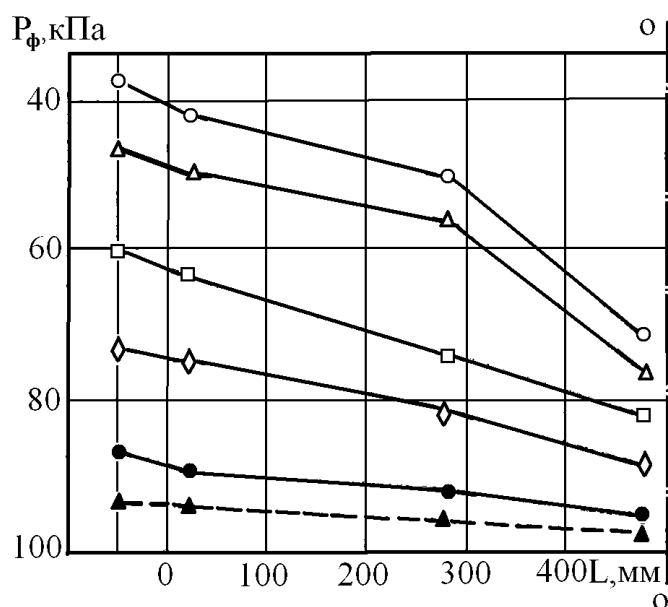


Рис. 2. Изменение разрежения P_ϕ в форме от расстояния L от стенки вакуумируемой опоки при различном исходном разрежении

Целью данной статьи является показать целостную структуру проведенных исследований в области регулирования теплоотвода в литейной форме, фрагменты которых отражены ранее в отдельных статьях, а также представить логику перехода к следующему этапу исследований, связанному с проектированием легковесных сберегающих металл литых конструкций. Эти работы раскрывают возможности песчаной формовки, прежде всего, в комбинации с физическими методами упрочнения формы.

На рис. 3 показана схема структуры исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливки в литейной форме. В первой колонке отражен базовый экспериментальный материал для последующего рассмотрения, полученный методом термического анализа, с пятью термодиаграммами при послойном измерении температуры в толще формы вокруг формирующейся из жидкого

металла отливки. В колонке показаны вариации с формовочной смесью, изменяющей ее теплофизические характеристики.

Вторая колонка характеризует математическое описание теплоотвода на базе экспериментального материала из первой колонки, которое показывает, какие параметры и ключевые механизмы определяют ускоренное охлаждения отливки в форме. Акцент сделан на активизации конвективной составляющей теплоотвода с последующим выводом аналитического выражения для расчета скорости охлаждения отливок, в зависимости от выбранного способа интенсивного охлаждения. В третьей колонке через характеристику интенсивности определяется процесс фильтрации хладагента под различным давлением. В четвертой колонке новыми техническими решениями уточняются классические требования из теории литейных процессов о необходимости выполнять все операции по регулированию теплоотвода в условиях направленных режимов газового и усадочного характера. Кроме того, предложены процессы с применением низких температур, давления на металл и управления прочностью формы для улучшения выбиваемости в случае применения смеси со связующим для форм или стержней. Пятая колонка отражает запатентованные технологические способы, главным образом основанные на принудительной конвекции,

включая использование в качестве движущейся среды сыпучего формовочного материала.

В результате проведенной работы согласно структуры (рис. 3) сделаны следующие выводы. Если охлаждение отливки в традиционной песчаной форме определяется теплопроводностью формовочных материалов со связующим в виде монолитной пористой конструкции, то формы с дисперсным наполнителем без связующего позволяют увеличить скорость охлаждения металлоизделия в 1,1-2,0 раза не только путем увеличения теплопроводности, но и уменьшения пористости наполнителя, охлаждения его перед формовкой, увеличения конвективной составляющей теплопереноса продувкой формы воздухом с ее одновременным вакуумированием, либо введением воды в песчаные слои формы, близкие к отливке. В производственных условиях простейшими способами повышения скорости охлаждения отливки в 1,1-1,5 раза в кварцевом песке процессов ЛГМ и ВПФ после заполнения формы металлом является дозированное увлажнение формы путем введения в нее воды с помощью всасывающего действия вакуума формы, а также перемещение песка в контейнере во время охлаждения отливок, по сравнению с такими способами формовки без принудительного охлаждения.

Математическим моделированием тепловых процессов получено выражение для коэффициента те-



Рис. 3. Структура исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливки в литейной форме

плоотдачи α , которое позволило по данным калориметрии определить его численные значения для различных способов принудительной конвекции, и расчет значения α включен в методику расчета скорости охлаждения, влияющей на характеристики структуры и свойств металла.

Выполнение дифференцированных свойств литейной формы должно вписываться в традиционные меры [4] по созданию направленного газового режима литейной формы при росте градиента газопроницаемости формовочной смеси по мере удаления от границы контакта отливки с формой, а также направленного затвердевания отливки с учетом следующей зависимости коэффициентов теплоаккумулирующей способности вакуумируемых, сырых песчано-глинистых, замороженных форм и чугунного холодильника $b_{\text{вф}} < b_{\text{пф}} < b_{\text{зф}} < b_{\text{чх}}$. При сравнительном анализе характеристик форм, упрочняемых с использованием физических явлений, предложен процесс совместного применения вакуумируемой формы и низкотемпературного стержня, а также показаны преимущества создания общего оборота смеси для форм и стержней указанных видов.

Разработан способ литья в вакуумируемую песчаную форму с применением повышенного газового давления на поверхность полости формы и металла отливки [5], включающий операцию ускорения кристаллизационных процессов в отливке за счет изостатического воздействия газового давления на стенки отливки, а также отключения вакуумирования формы для экономии энергозатрат. Разработаны способы поддержания низкой температуры замороженной формы путем применения хладагента с продуванием его через поровое пространство формы, а также подачей его в полость формы при помощи удаляемых дозаторов.

Предложены технологии воздействия на кристаллизацию и охлаждение отливки в песчаной вакуумируемой форме при дозированной подаче жидкого хладагента переносными устройствами в контактную зону отливки с формой, способ пропускания через песчаную форму жидкого хладагента в больших количествах с возможностью закалки отливки в песчаной форме как в «песчано-водяной ванне», а также способ литья корпуса блока цилиндров с регулируемым охлаждением избирательных поверхностей отливки и методом расчета оптимального количества влаги в песке до 8%.

Анализ явлений проницаемости при фильтрации хладагентом песчаной литейной формы, как капиллярно-пористого материала для регулирования охлаждения отливки, выполнен с помощью характеристики интенсивности, а также предложена математическая модель интенсивности пропитки хладагентом для проектирования массообменных процессов в капиллярах.

Для конвективного теплообмена между отливкой и формой предложены способы регулируемого гравитационного течения зерен песка без пыления песка, а также способ регулируемого охлаждения частей отливки и отдельных ее поверхностей путем частичного удаления верхнего слоя песка формы с использованием вакуумирования.

Разработан способ изготовления двухслойных отливок, типа валков, по газифицируемым моделям с регулируемым охлаждением отдельных частей отливки металлическим холодильником и применением пористой огнеупорной прослойки между слоями отливки для релаксации усадочных напряжений, возникающих между слоями, предусмотрена возможность пропитки такой прослойки клеящими составами.

Для управления термо-прочностными свойствами песчаной формы с жидкостекольным связующим создана технология со снижением его содержания до 3% и частичным замещением добавкой 2% отходов полистирола в виде 40%-го раствора в живичном скипидаре в предложенной песчаной смеси, обладающей свойствами высокой прочности и улучшенной выбиваемости.

С точки зрения металлосбережения разработанные процессы управления интенсивностью теплоотвода в литейной форме расширяют возможность получения легковесных отливок с заданной структурой металла и повышенными его свойствами по следующим соображениям: 1) ускоренное охлаждение практически всегда измельчает зерно структуры и упрочняет металл, что позволяет снижать металлоемкость отливок; 2) использование текучести песка для охлаждения отливки позволили по-новому взглянуть на конструкцию отливки с использованием такой текучести при формовке; 3) снижение металлоемкости отливок целесообразно проводить по принципу сочетания точных способов литья с базой данных высокопрочных сплавов [6].

Исследование в области конструирования легковесных отливок проводили в таких направлениях: 1) наследования конструкций и структур живой и неживой природы; 2) анализа концепций рационального замощения пространства (в частности, объема песчаной формы) в сочетании с конструированием разовых моделей при условии малозатратного их производства; 3) использования новейших компьютерных программ (в том числе для 3D технологий) и методов прикладной математики [7] (рис. 4).

По итогам проведенной работы согласно структуры (рис. 4) сделаны следующие выводы. В результате анализа функции литейной модели при ЛГМ как конструкции, воздействующей с двумя текучими средами – заливаемым металлом, замещающим модель изнутри, и подвижной песчаной средой, обтекающей поверхность модели снаружи, разработана концепция конструирования легковесных литых металлоконструкций с ячеистой и сотовой структурой. На основе анализа структур неорганических веществ, как их представляет современное естествознание, разработаны, в том числе, по методу компьютерного проектирования структур материалов, ячеистые конструкции отливок по аналогам строения кристаллических и аморфных структур, квазикристаллов на основе мозаики Пенроуза и углеродных нанотрубок, а также способы изготовления для них литейных моделей.

Разработаны конструкции отливок и способ монтажа модельных кластеров на многоярусных стояках-коллекторах по принципу ботанического явления филлотаксиса, на основе математических моделей

Исследование методов металлосбережения и разработка конструкций легковесных отливок

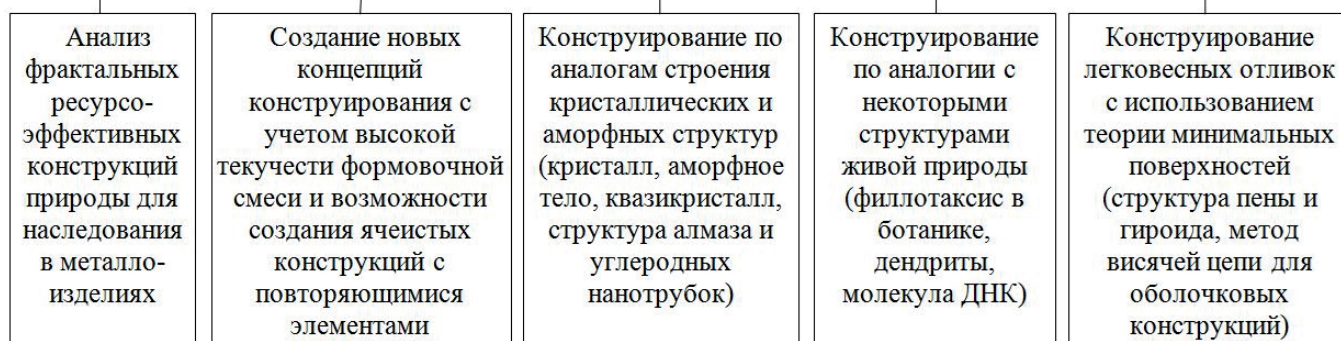
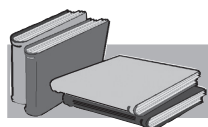


Рис. 4. Структура исследований и разработок в области конструирования легковесных отливок

из фрактальной геометрии по аналогии с древовидными структурами, а также со структурой ДНК. Предложен ряд математических концепций проектирования каркасно-ячеистых отливок, оптимально заполняющих пространство в объеме песка литейной формы, с использованием теории минимальных поверхностей, аналогично строению пены с ячейками в виде пентагональных додекаэдров, как прообразов легковесных металлоизделий со способом сборки разовых моделей из повторяющихся деталей.

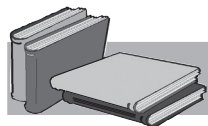
Таким образом, в статье рассмотрены структура, итоги исследований и технологических разработок

по регулированию скорости охлаждения отливки. В развитие темы об ускоренном охлаждении и вызванном им упрочнении отливок, а также на основе полученного опыта использования текучести песка как подвижной среды вокруг отливки, выполняются исследования по проектированию легковесных ячеистых отливок как сберегающих металл конструкций. Взаимосвязь работ служит примером поэтапного совершенствования процессов точного литья.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В. В.* Теоретические и технологические основы изготовления качественных отливок в вакуумно-пленочных формах / В. В. Иванов: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.16.04 / – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 40 с.
2. *Минаев А. А., Ноткин Е. Б., Сазонов В. А.* Вакуумная формовка. – М.: Машиностроение. – 1984. – 216 с.
3. *Дорошенко В. С.* Регулирование охлаждения отливки в вакуумируемой форме фильтрацией хладагентов и движением частиц песка / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2013. – № 10. – С. 32-37.
4. *Дорошенко С. П., Шинский О. И., Дорошенко В. С.* Трехмерный подход к формированию направленных газового, усадочного и противопригарно-прочностного режимов при литье в песчаную форму // Процессы литья. – 2007. – № 3. – С. 9-13.
5. *Дорошенко В. С.* Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2016. – № 1. – С. 25-28.
6. *Шинский О. И.* Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли // Оборудование и инструмент для профессионалов / О. И. Шинский. – 2011. – № 1. – С. 78-79.
7. *Дорошенко В. С.* Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок / В. С. Дорошенко // Литейное производство. – 2013. – № 2. – С. 9-12.



REFERENCES

1. *Ivanov V. V.* (2006). Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy izgotovleniya kachestvennykh otlivok v vakuumno-plenochnykh formakh. [Theoretical and technological bases of manufacture of high-quality castings in a vacuum-film molds]. Extended abstract of Doctor's thesis. Komsomol'sk-na-Amure, 40 p. [in Russian].
2. *Minaev A. A., Notkin E. B., Sazonov V. A.* (1984). Vakuumnaya formovka. [Vacuum Molding]. Moscow: Mashinostroenie, 216 p. [in Russian].
3. *Doroshenko V. S.* (2013). Regulirovaniye okhlazhdeniya otlivki v vakuumiruemoi forme filtratsiei khladagentov i dvizheniem chastits peska. [Adjusting the cooling of the casting in the mold of filtration evacuated refrigerant and the movement of sand particles]. Liteynoye proizvodstvo, no. 10, pp. 32-37. [in Russian].
4. *Doroshenko S. P., Shinskii O. I., Doroshenko V. S.* (2007). Tredimnyy podkhod k formirovaniyu napravlennykh gazovogo, usadochnogo i protivoprigarno-prochnostnogo rezhimov pri lit'e v peschanuyu formu. [Tree-pronged approach to the formation direction of the gas, and shrink-stick-strain modes for sand mold casting]. Protsesty lit'ya, no. 3, pp. 9-13. [in Russian].

5. Doroshenko V. S. (2016). Lit'e po gazifitsiruemyim modeliam s kristallizatsiei metalla pod davleniem. [Lost foam casting with metal crystallization under pressure]. Liteinoe proizvodstvo, no. 1, pp. 25-28. [in Russian].
6. Shinskii O. I. (2011). Snizhenie metalloemkosti liteinoi produktsii – osnova razvitiia otrasli. [Decrease of metal casting products – the basis of development of the industry]. Oborudovanie i instrument dlia professionalov, no. 1, pp. 78-79. [in Russian].
7. Doroshenko V. S. (2013). Matematicheskoe proektirovanie karkasno-yacheistykh otlivok. [Mathematical design of the cellular skeleton castings]. Liteinoe proizvodstvo, no. 2, pp. 9-12. [in Russian].

Анотація

Дорошенко В. С.

Структура досліджень і технологічних розробок з регулювання швидкості охолодження виливків і перехід до конструювання легковагих виливків

Розглянуто структуру, результати досліджень і технологічних розробок з регулювання швидкості охолодження виливків. У розвиток теми про прискорене охолодження і викликане ним зміцнення виливків, а також на основі здобутого досвіду використання плинності піску як рухомого середовища навколо виливка, виконуються дослідження з проектування легких комірчастих виливків як конструкцій, що зберігають метал. Взаємозв'язок робіт служить прикладом поетапного вдосконалення процесів точного лиття.

Ключові слова

Охолодження виливки, піщана форма, збереження металу, вакуумне формування, разова модель, зміцнення суміші, лиття за моделями, що газифікуються.

Summary

Doroshenko V.

The structure of the research and technological development by regulating the cooling rate of casting and the transition to the construction of lightweight castings

The structure, the results of research and technological development by regulating the cooling rate of castings have been considered. In the development of the theme of accelerated cooling and the consequent hardening of castings caused by it, as well as on the basis of the experience of using sand as the flow around the fluid cast, the researches on the design of lightweight cellular metal castings as the saving designs are performed. The interrelation of works is an example of iterative improvement of processes of precision casting.

Keywords

Cooling of the casting, sand casting, saving of metal, vacuum molding, a single model, hardening of mixture, lost foam casting.

Поступила 05.12.16