

УДК 621.671:001.891.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЕСКОВЫХ И ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ. СООБЩЕНИЕ 1

**Е.Б. Агапитов**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплотехнические и энергетические системы»

**К.Н. Вдовин**, д.т.н., профессор кафедры «Литейное производство и материаловедение»

**С.Ю. Волков**, мл. научн. сотрудник кафедры «Литейное производство и материаловедение»

Магнитогорский государственный технический университет (Магнитогорск, Россия)

**Аннотация.** В целях изучения возможностей снижения времени и затрат на разработку и доводку новых проточных частей рудных насосов проведено математическое моделирование работы насоса серии Гр с помощью программного комплекса ППП FlowVision. Созданная трехмерная модель насоса серии Гр 8 и проведенные расчеты гидродинамики рабочего тела базовой конструкции насоса позволили оценить зоны повышенных скоростей потоков. Обнаружено, что расчетные зоны хорошо совпали с зонами повышенного износа, что подтвердило адекватность модели и позволило определять направления совершенствования геометрии (конструкции) рабочих органов насоса.

**Ключевые слова:** надежность, долговечность, износостойкий чугун, структура, математическая модель, геометрия рабочего колеса, твердость, износ, гидроабразивный износ, ударно-абразивный износ, легирование.

E-MAIL: vs\_mgtu@mail.ru

Измельчение и основные процессы обогащения руд цветных и черных металлов, угля и горно-химического сырья связаны с необходимостью перемещения больших объемов рудных гидровзвесей (пульп). Для реализации сложных технологических схем обогащения на современных фабриках и удаления хвостов широко применяют центробежные песковые и грунтовые насосы. Повышение надежности и долговечности рабочих деталей насосов представляет особый интерес вследствие их усиленного износа под воздействием абразивных частиц. Из строя, в первую очередь, выходят рабочие колеса, отводы и уплотняющие элементы, что приводит к значительным ремонтным расходам и снижению производительности насосов.

Анализ работы насосов серии Пб, Пс и Гр, работающих на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) и ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (УГОК), предназначенных для перекачивания грунтовых и рудных пород показал, что при их эксплуатации отмечается недостаточная долговечность элементов, в особенности рабочих колес [1]. Обычно этот недостаток проявляется при переработке сильно абразивных пород. Так, например, в условиях УГОК рабочее колесо насоса серии Гр меняется каждые 5 сут. (рис. 1), в условиях ММК срок службы подобных насосов – серии Грат составляет 12 сут. [2]. Поэтому проблема повышения долговечности деталей грунтовых насосов, эксплуатируемых в тяжелых абразивных условиях, является актуальной.

В Магнитогорском государственном техническом университете были проведены исследования и получены новые научные сведения по износостойкости большой группы белых высокохромистых чугунов ( $Cr \geq 12\%$ ) с эвтектикой на базе  $M_7C_3$  и дополнительно

легированных Si, Mn, Ni, Mo, V, Ti, Cu, B, Sb, Ca, которые могут быть использованы в качестве базы данных для выбора новых износостойких сплавов [3 – 5].

Известно, что получение заданного комплекса свойств износостойких чугунов возможно только в многофазных сплавах. Поэтому основным требованием к их структуре является гетерогенность. Поскольку более мягкие составляющие изнашиваются сильнее, удельная нагрузка увеличивается на более высокие износостойкие структурные составляющие и уменьшается на менее износостойкие. Основной вклад в сопротивление сплавов абразивному изнашиванию вносят более твердые составляющие – специальные карбиды  $M_7C_3$  и  $MC$ , поскольку они играют большую роль в формировании износостойких качеств белых чугунов [3].



Рис. 1. Характер износа рабочего колеса насоса Гр после проведения рабочего цикла

Назначение легирования белых износостойких чугунов – упрочнение твердого раствора и образование раздробленных зернистых карбидов минимальных размеров, равномерно расположенных в металлической матрице, что достигается выбором оптимального легирующего и модифицирующего комплекса. При этом должно учитываться влияние легирующих элементов на структуру и свойства чугунов как в литом, так и в термообработанном состояниях.

Анализ влияния химического состава показал, что в зависимости от содержания легирующих элементов существенно меняется литая структура и свойства белых высокохромистых чугунов. Структура доэвтектических чугунов состоит из кристаллов первичного аустенита, продуктов его распада и аустенитно-хромистокарбидной эвтектики, а заэвтектических – первичных кристаллов карбидов  $(Fe, Cr)_7C_3$ ,  $(Fe, Cr)_{23}C_6$  и эвтектики. В эвтектике тех и других чугунов могут присутствовать продукты распада аустенита: мартенсит, тростит, перлит. Элементы, способствующие увеличению прокаливаемости и закаливанию высокохромистых чугунов и не снижающие при этом точки начала мартенситного превращения (Mo, V, Ti, B), повышают количество мартенсита в литой структуре и, наряду с образованием своих карбидов, повышают износостойкость, прочность и твердость чугунов. Элементы, увеличивающие прокаливаемость и закаливанию чугунов, и снижающие точку  $M_n$  (Mn и Ni), увеличивают долю остаточного аустенита в литой структуре сплавов и снижают износостойкость. При термической обработке (закалке) все эти элементы действуют одинаково и способствуют получению мартенситной структуры [3, 5].

В целях изучения возможностей снижения времени и затрат на разработку и доводку новых проточных частей центробежных насосов было проведено математическое моделирование работы насоса серии Гр с помощью программного комплекса ППП FlowVision.

Проточный канал грунтовых насосов подвергается как равномерному, так и местному абразивному изнашиванию. Последнее является одной из основных причин сравнительно быстрого выхода из строя деталей насосов. Локальный износ возникает там, где поток изменяет свое направление, движется с большой относительной скоростью, имеются зоны завихрений или появляются циркуляционные массы абразивной гидросмеси. Таким образом, с целью повышения срока службы насосов, необходимо предусматривать такие формы их проточного канала, которые могли бы противостоять изнашиванию или снизить степень влияния этих факторов.

Как показали исследования, долговечность рабочих колес при эксплуатации их на гравийных грунтах более целесообразно повышать за счет увеличения не толщины, а длины лопаток путем расположения входных кромок последних ближе к оси насоса.

Математическое моделирование гидродинамики потока внутри насоса позволит выявить основные места износа и подобрать форму меридионального сечения колеса, рассчитать радиус расположения лопаток, их форму и угол среза лопастей лопаток на входе потока.

Поскольку существенную роль в формировании износостойких качеств, прочности и твердости исследованных чугунов играет морфология карбидной фазы при первичной кристаллизации, проведено модифицирование сплавов небольшим количеством бора, сурьмы, кальция, что существенно измельчило карбиды, они стали тоньше, уменьшилась их длина. Это способствовало более равномерному распределению карбидов в матрице с образованием своеобразного каркаса. Наряду с этим произошло измельчение кристаллов первичного аустенита.

Программный комплекс FlowVision предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики [4].

Математическая модель движения жидкости или газа представлена в виде уравнений в частных производных, определяющих законы сохранения (энергии, массы, импульса) и уравнений состояния жидкости. Модификация модели возможна через интерфейс FlowVision путем отключения части уравнений модели (а вместе с ними и рассчитываемых переменных) и через изменение констант модели [4].

В решаемой задаче в каждой подобласти использована модель турбулентного несжимаемого течения. Выбранная модель и рассчитываемые уравнения означают, что решение задачи будет произведено для турбулентного течения, в котором будут решены только уравнения Навье-Стокса и уравнения для турбулентных функций переноса.

Модель турбулентной несжимаемой жидкости основана на использовании турбулентной вязкости  $\mu_t$ . Определение  $\mu_t$  зависит от выбранной модели турбулентности. В модели присутствуют следующие уравнения.

- Уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla V^2 = \frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla [(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S, \quad \nabla V = 0, \quad (1)$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $V$  – скорость, м/с;  $P$  – давление, Па;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $\mu_t$  – турбулентный коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $T$  – температура, °С;  $S$  – источник, м<sup>2</sup>, равный

$$S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (2)$$

где,  $\rho_{hyd}$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $B$  – сила вращения, Н;  $R$  – расстояние, м.

Во вращающейся системе координат силы вращения (Кориолиса и центробежная) имеют вид:

$$B = -2\omega V - \omega^2 r, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость потока, рад/с;  $r$  – радиус скручивания, м.

• Уравнение энергии

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left[ \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right] + \frac{Q}{\rho}, \quad (4)$$

где  $h$  – расстояние, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $C_p$  – удельная теплоемкость среды, Дж/кг·К;  $Q$  – количество тепла, Дж;  $Pr_t$  – критерий Прандля.

Ниже показано соответствие имен уравнений (систем уравнений) и входящих в них зависимых и независимых переменных для модели турбулентного массопереноса.

| Общепринятое название                                                                                         | Имя в FlowVision   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Уравнение Навье-Стокса (закон сохранения импульса). Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости) | Скорость           |
| Закон сохранения энергии                                                                                      | Энергия            |
| Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)                                  | Концентрация массы |
| $k - \epsilon$ модель турбулентности                                                                          | Турбулентность     |

Из физических параметров в каждой подобласти задаются только свойства, установленные для этой модели по умолчанию: плотность и молекулярная вязкость исследуемой среды.

Следующий шаг создания расчетного варианта – это задание граничных условий (ГУ) на границе расчетной области, они задаются для каждой из расчетных переменных. Чтобы облегчить выбор и исключить постановку несовместимых граничных условий, они объединены в две группы типов границ, соответствующих некоторому физическому процессу, происходящему на границе:

- типы «стенка с и без вдува»;
- типы специальных границ, в которые входят периодические, сопряженные граничные условия и скользящая поверхность.

Совокупность типов границ «стенка с и без вдува» включает следующие типы границ:

- стенка;
- вход/выход;
- свободный выход;
- симметрия.

Соответствие типа граничного условия моделируемой границе показано ниже.

| Имя типа границы | Моделируемая граница          |
|------------------|-------------------------------|
| Стенка           | Твердая стенка нет протекания |
| Вход/Выход       | Стенка со вдувом или отсосом  |
| Свободный выход  | Выходная граница потока       |
| Симметрия        | Условие симметрии             |

Каждый тип границы включает в себя наборы граничных условий для каждой независимой переменной данной математической модели (рис. 2). Рассмотрим эти наборы для скоростей жидкости, давления и скалярной переменной.

Принято допущение, что нормаль к границе расчетной области направлена внутрь области, как показано на рис. 3. Чтобы поставить ГУ для скоростей жидкости, скорость  $V$  раскладываем на нормальную  $V_n$  и тангенциальную  $V_t$  составляющие (рис. 3).

После задания ГУ связывались ГУ «скользящая поверхность» двух подобластей. Кроме граничного условия «скользящая поверхность», требовалось также связывать условия «сопряженное» и «периодическое» (см. рис. 2).

На границе 1 – ГУ стенки с логарифмическим профилем скорости у стенки (стенка → стенка, логарифмический закон). На границе 2 – ГУ входа с нормальной скоростью  $V = 20$  м/с (вход/выход → нормальный вход/выход → значение скорости равно 20) и турбулизацией в 1 % с размерами вихрей 1/10 диаметра трубы (пульсации = 0,01, масштаб турбулизации = 0,01). На границе 3 – ГУ вращающейся стенки с логарифмическим профилем скорости у стенки (стенка → вращающаяся стенка, логарифмический закон). На границе 4 – ГУ свободного выхода с нулевым давлением  $p = 0$  (свободный выход → нулевое давление/выход). На границе 5 – ГУ «скользящая поверхность» (скользящая поверхность → скользящий).

Эффективность моделирования во многом определяется качеством построенной рабочей сетки. Для проведения расчета необходимо было задавать сетку нулевого уровня (начальную сетку). На первом этапе строилась грубая расчетная сетка, состоящая из нескольких тысяч ячеек (3500 – 4000). В данной задаче требуется измельчение сетки на лопатках ротора (ГУ 3), для этого лучше всего подходит адаптация по граничному условию. На последующих этапах производилось уточнение расчетной сетки и ее измельчение. После окончания процесса уточнения расчетной сетки количество расчетных ячеек превысило 600 000 ячеек. При этом при увеличении числа расчетных ячеек, т. е. при уменьшении размеров ячеек сетки, также уменьшался и шаг по времени, который на последнем этапе расчета составил  $5 \cdot 10^{-5}$  с.

На последнем этапе определения модели необходимо было задавать глобальные параметры. Здесь за-

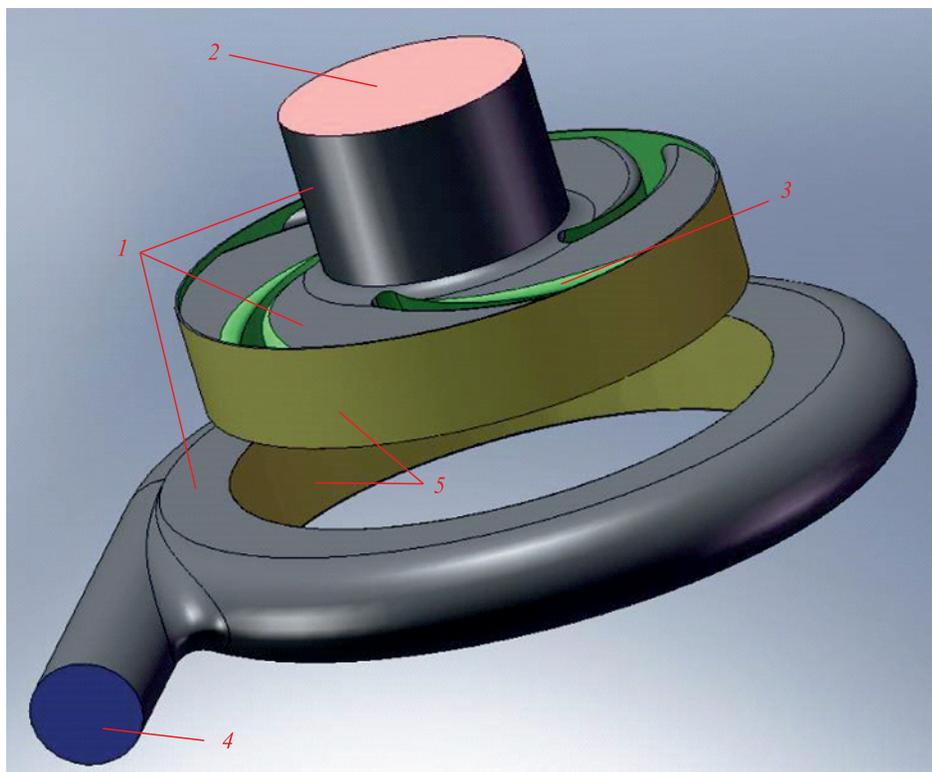


Рис. 2. Задание граничных условий:  
1 – 5 – граничные условия

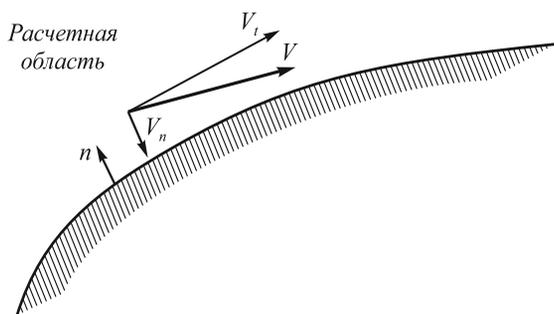


Рис. 3. Направление нормали к границе и разложение вектора скорости

давались условия продолжения расчета, вектор силы тяжести, время расчета и сохранения варианта, шаг по времени и опции процесса расчета. В данной задаче требовалось задание только шага по времени и, так как использовалась модель несжимаемой жидкости, можно было задавать фиксированный шаг по времени, исходя из пролетного времени.

Результаты проведенной работы по расчету проточной части насоса Гр 8 показали, что наиболее уязвимыми элементами рабочего колеса являются концевые и начальные участки лопаток, где возникают наибольшие напряжения и турбулентности, а также начальный участок выходного узла насоса, где возникают турбулентности, приводящие к повышенному износу корпуса.

Полученные расчетные зависимости совпадают с наблюдаемыми на практике зонами износа (см. рис. 1).

Это позволяет говорить об адекватности разработанной модели реальным физическим процессам износа элементов насосов при транспортировке гидросмесей с различными абразивными характеристиками и позволяет спроектировать новую конструкцию рабочего колеса насоса серии Гр.

Кроме того, выявленные в ходе моделирования области наиболее изнашиваемых частей рабочего колеса позволили сформулировать требования к конфигурации рабочего колеса, обеспечивающие более высокую износостойкость.

Созданная трехмерная модель насоса серии Гр 8 и проведенные расчеты гидродинамики рабочего тела базовой конструкции насоса позволили оценить зоны повышенных скоростей потоков. Обнаружено, что расчетные зоны совпадают с зонами повышенного износа, что подтверждает адекватность модели и позволяет определять направление совершенствования геометрии рабочих органов насоса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заматаев Н.Г., Потапов Г.М., Потапов М.Г. и др. // Литейные процессы: Межрегион. сб. науч. тр. Вып.1. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. С. 44 – 49.
2. Погодаев Л.И., Лукин Н.В. Режимы работы и долговечность деталей землесосных снарядов. – М.: Транспорт, 1990. – 192 с.
3. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М. Мулявко Н.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин и др. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 228 с.

4. Тухватулин И.Х. Разработка нового состава стали при помощи нейросетевого метода: Дис...канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2002. – 150 с.
5. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Э.Х. Ри,

В.М. Колокольцев, Хосен Ри и др. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 257 с.

© 2014 г. Е.Б. Агапитов, К.Н. Вдовин, С.Ю. Волков  
Поступила 4 февраля 2014 г.

---

## MODELING AND CALCULATION OF STRUCTURES OF CAST PARTS OF CENTRIFUGAL GRAVEL AND GROUNDWATER PUMPS TO OPTIMIZE THEIR GEOMETRY AND THE DEVELOPMENT OF NEW CHEMICAL COMPOSITION OF THE ALLOY. PART 1

*E.B. Agapitov, Dr.Eng., Professor, Head of the Chair of Thermal and Energy systems*

*K.N. Vdovin, Dr.Eng., Professor of the Chair of Electrometallurgy and foundry production*

*S.J. Volkov, Junior Researcher of the Chair of Materials Science and Foundry*

**Magnitogorsk state technical university of G.I. Nosov (Magnitogorsk, Russia)**

*E-MAIL: vs\_mgtu@mail.ru*

**Abstract.** In order to explore the possibilities of time and cost reduction of developing and perfecting new ore flow parts of pumps was used mathematical modeling of the “Gr” series pump with the software package “FlowVision”. A three-dimensional model of “8 Gr” series pump and the calculations of hydrodynamics working fluid pump base design allowed authors to estimate the zone of elevated flow rates. It was found that the calculated areas are well coincided with areas of high wear, which confirmed the adequacy of the model and allowed to determine the direction of improving the geometry (structure) of the pump.

**Keywords:** reliability, durability, wear-resistant cast iron, structure, the mathematical model, the geometry of the impeller, hardness, wear, hydroabrasive wear, shock-abrasion wear, alloying.

### REFERENCES

1. Zamataev N.G., Potapov G.M., Potapov M.G., Voronkov B.V., Ahmetov Ju.G. *Litejnye processy: Mezhrigion. sb. nauch. tr. Vyp. 1.* (Casting processes: Interregional collection of scientific papers. Issue 1). Magnitogorsk: MG TU. 2000. pp. 44 – 49.
2. Pogodaev L.I., Lukin N.V. *Rezhimy raboty i dolgovechnost' detalej zemlesosnyh snarjadov.* (Modes and component life of dredges). Moscow: Transport, 1990. 192 p.
3. *Abrazivnaja iznosostojkost' lityh metallov i splavov.* (Abrasive wear resistance of cast metals and alloys). Kolokol'cev V.M., Muljavko N.M., Vdovin K.N. etc. ed. Magnitogorsk: MG TU, 2004. 228 p.
4. Tuhvatulin I.H. *Razrabotka novogo sostava stali pri pomoshhi nejrossetevogo metoda: Dis. kand. tehn. nauk* (Development of a new composition of steel using neural network method: Cand. Tech. Sci. diss.). Magnitogorsk. 2002. 150 p.
5. Ri Je.H, Kolokol'cev V.M., Ri Hosen, Petrochenko E.V., Voronkov B.V. *Kompleksno-legirovannye belye чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состоянии: Монография* (Complex-alloyed white cast irons functionality in a cast and heat-treated states: Monograph). Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 257 p.

Received 4 February 2014