

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАРТЕРЕ ВЕДУЩЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЯ СЕМЕЙСТВА «КАМАЗ»

Жестков М.Н.<sup>1</sup>, М.Л. Сазонова М.Л.<sup>1</sup>, Шмелев В.В.<sup>1</sup>  
Валеев Д.Х.<sup>2</sup>, Карабцев В.С.<sup>2</sup>, Ильясов Ф.Г.<sup>2</sup>, Русаков В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «ТЕСИС», г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

### **Аннотация.**

В настоящей работе представлена методика разработки расчётной модели и результаты численного моделирования в программном комплексе FlowVision гидродинамических процессов в картере ведущего моста автомобиля семейства «КАМАЗ». В ходе исследования рассмотрены три режима работы агрегата, отличающихся рабочей температурой трансмиссионного масла и угловыми скоростями вращающихся деталей.

Это позволило оценить динамику движения масла и эффективность смазывания поверхностей деталей. На основе экспертной оценки и анализа результатов моделирования сделаны выводы об адекватности разработанной расчётной модели и возможности применения данного программного комплекса для исследования гидродинамических процессов в картере ведущего моста автомобиля семейства КАМАЗ-6520 и других агрегатов.

Ключевые слова: программный комплекс FlowVision, модель течения, математическая модель, трансмиссия, сателлиты, граничные условия, гидродинамические процессы в картере ведущего моста.

### **Annotation.**

The current work presents a development methodology of calculation model and results of numerical simulation in FlowVision software of hydrodynamic processes in the driving axle housing of a «KAMAZ» family vehicle. In the research process we studied three operating modes of the aggregate different from each other with gear oil operating temperature and angular speeds of rotating parts.

It allowed us to evaluate dynamics of oil movement and effectiveness of parts surfaces lubrication. On the basis of expert review and simulation results analysis we made conclusions on conformity of the calculation model and possibility of using this software to research hydrodynamic processes in the driving axle housing of KAMAZ-6520 family vehicle and other aggregates.

Key words: FlowVision software, flow model, mathematic model, gear, satellites, boundary conditions, hydrodynamic processes in the driving axle housing.

### **Введение.**

Ведущие мосты грузового автомобиля оказывают непосредственное влияние на многие потребительские свойства автомобиля – тяговые и динамические характеристики, топливную экономичность, уровни внешнего

шума, плавность хода, опорную проходимость, и т.д. Практикой доказано, что как минимум первые три из указанных свойств в значительной степени определяются режимами смазки вращающихся деталей и характеристиками трансмиссионного масла, т.е. зависят от КПД агрегатов.

Исследованию условий работы механизмов ведущего моста грузового автомобиля и его системы смазки в условиях лабораторных и стендовых испытаний посвящены работы зарубежных [1] и отечественных специалистов [2].

В последние годы в практике проектирования автомобильной, тракторной и сельскохозяйственной техники все большее применение находят технологии «цифровых испытаний» или компьютерного моделирования. Так, авторы работ [3], [4] и [5] предложили применять аппарат математического моделирования для расчета подачи масла к деталям и агрегатам трансмиссий сельскохозяйственных машин. На основе выполненных расчетных исследований доказано, что применение предложенных специалистами методов решений уравнений гидродинамики позволяет с достаточной точностью рассчитывать поступление масла к различным деталям трансмиссии. Использование компьютерных моделей в процессе проектирования систем смазки трансмиссии продемонстрировано и в работах зарубежных специалистов [6] и [7].

Цель настоящей работы – разработать методику компьютерного моделирования гидродинамических процессов смазки в картере ведущего моста автомобиля в программном комплексе FlowVision.

Научной новизной работы является новый метод решения актуальной проблемы с использованием технологии компьютерного моделирования.

## 1. Геометрическая модель ведущего моста

Численное моделирование гидродинамических процессов в картере ведущего моста автомобиля семейства «КАМАЗ» выполнено в программном комплексе FlowVision. Общий вид картера представлен на рисунке 1.

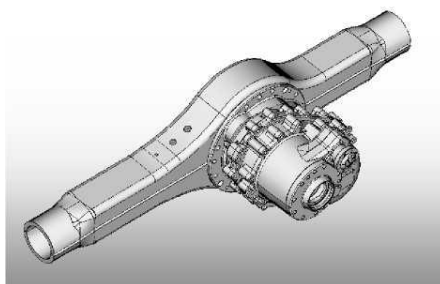


Рисунок 1 – Картер ведущего моста

Твердотельные геометрические модели исследуемого фрагмента картера моста – проточная часть, а также ведущее и центральное колёса, две полуоси, сателлиты и подшипники – приведены на рисунках 2-3.

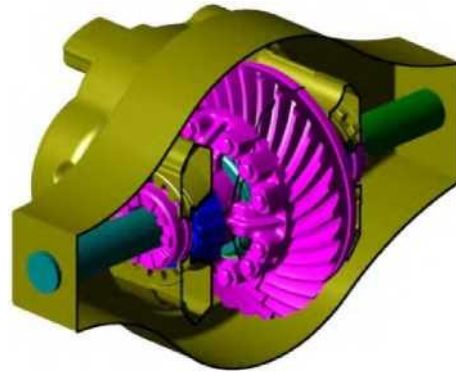


Рисунок 2 – Твёрдотельная модель фрагмента картера моста в сборе



а) полуоси и сателлиты



б) ведущее, центральное колеса и подшипники

Рисунок 3 – Твёрдотельные модели подвижных элементов картера

## 2. Расчетные режимы

Моделирование гидродинамических процессов в картере моста выполнено для следующих трех режимов его работы:

1 – частота вращения ведущего колеса 2500 об/мин; полуоси вращаются с одинаковой частотой, температура масла  $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (высокая частота – «холодное» масло);

2 – частота вращения ведущего колеса 2500 об/мин; полуоси вращаются с одинаковой частотой; температура масла  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (высокая частота – «горячее» масло);

3 – частота вращения ведущего колеса 1600 об/мин; одна полуось вращается с частотой в 2 раза меньшей, чем другая; температура масла  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (средняя частота – средняя температура масла).

## 3. Математическая модель

### 3.1. Уравнения динамики течения трансмиссионного масла

Исследование распределения масла в рабочей области картера ведущего моста выполнено в рамках модели течения несжимаемой жидкости под действием вращающихся элементов конструкции в поле тяжести. Модель содержит следующие уравнения, описывающие поля скорости и давления:

уравнение неразрывности

$$\nabla(\rho\mathbf{V}) = 0; \quad (1)$$

уравнения Навье-Стокса

$$\frac{\partial \rho\mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \hat{\mathbf{\tau}}_{eff} + \rho\mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{t}}_{eff} = (\mu + \mu_t) \left( 2\hat{\mathbf{S}} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{V})\hat{\mathbf{I}} \right), \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность масла, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\mathbf{V}$  – вектор скорости, м/с;  $P$  – давление, Па;  $\hat{\mathbf{t}}_{eff}$  – эффективный тензор вязких напряжений, Па;  $\mu$  – молекулярный коэффициент динамической вязкости, кг/(м·с);  $\mu_t$  – турбулентный коэффициент динамической вязкости, кг/(м·с);  $\hat{\mathbf{S}}$  – тензор скоростей деформации, с<sup>-1</sup>;  $S_{ij} = \partial V_i / \partial x_j + \partial V_j / \partial x_i$  – компоненты тензора скоростей деформации, с<sup>-1</sup>;  $\hat{\mathbf{I}}$  – единичный тензор;  $\otimes$  – символ векторного произведения;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для моделирования переменной во времени границы раздела «трансмиссионное масло – внешняя среда», включая брызгообразование, применена модель переноса фазы «VOF» (Volume Of Fluid). Перенос фазы описывается уравнением для объёмной доли фазы масла в расчётной ячейке:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla F = 0, \quad (4)$$

где  $F$  – переменная VOF.

Переменная  $F$  принимает значения от 0 (в ячейке нет масла) до 1 (ячейка полностью заполнена маслом). При  $0 < F < 1$  ячейка, содержащая границу раздела между маслом и внешней средой, делится на две – полностью заполненную маслом и пустую. Начальный уровень заливки масла соответствует значению 46% от полной высоты картера (см. рисунок 4).

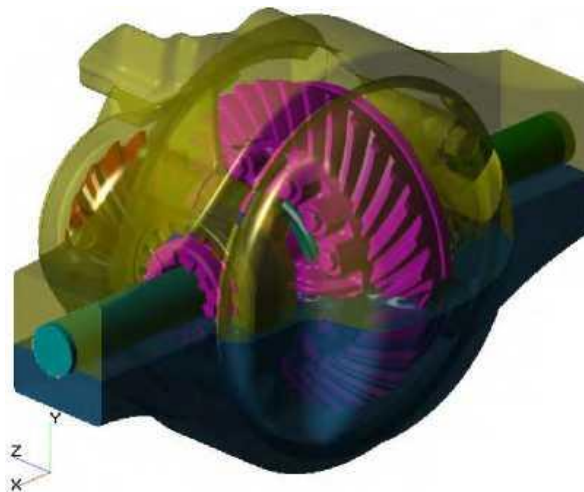


Рисунок 4 – Начальный уровень заливки масла

### 3.2. Физические параметры масла

Плотность масла рассчитывалась по формуле:

$$\rho|_T = \rho|_{20^\circ\text{C}} - \Delta T \cdot (T - 20),$$

где  $\rho|_T$  – плотность при расчётной температуре;  $\rho|_{20^\circ\text{C}}$  – плотность при температуре 20°C, равная 900 кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T$  – поправочный коэффициент, равный 0,00062 кг/(м<sup>3</sup>·К°);  $T$  – расчётная температура.

Молекулярная динамическая вязкость масла вычислялась по формуле:

$$\mu = 39,16885 - 0,3915575 \cdot T.$$

В ходе исследования для каждого расчётного случая температура задавалась постоянной.

### 3.3. Моделирование вращающихся элементов

Для моделирования вращения ведущего и центрального колёс, двух полуосей с подшипниками и сателлитов с учётом зубчатых зацеплений использовался модуль «Подвижные тела». Данный модуль позволяет моделировать движение твёрдых тел, в том числе по заданному закону, в данном исследовании – вращение с заданной угловой скоростью. В FlowVision вращение подвижного тела задаётся проекциями вектора угловой скорости на оси основной системы координат  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ .

Для ведущего колеса определяется вектор  $(0, 0, \omega_z)$ , для других подвижных элементов, за исключением сателлитов, – вектор  $(\omega_x, 0, 0)$  в системе координат, представленной на рисунке 5. Движение сателлитов представляет собой сложное движение. Сателлит вращается с частотой  $\omega_{\text{собств}}$  вокруг собственной оси симметрии, которая вращается с частотой  $\omega_{\text{центр}}$ , совпадающей с частотой вращения центрального колеса (см. рисунок 5).

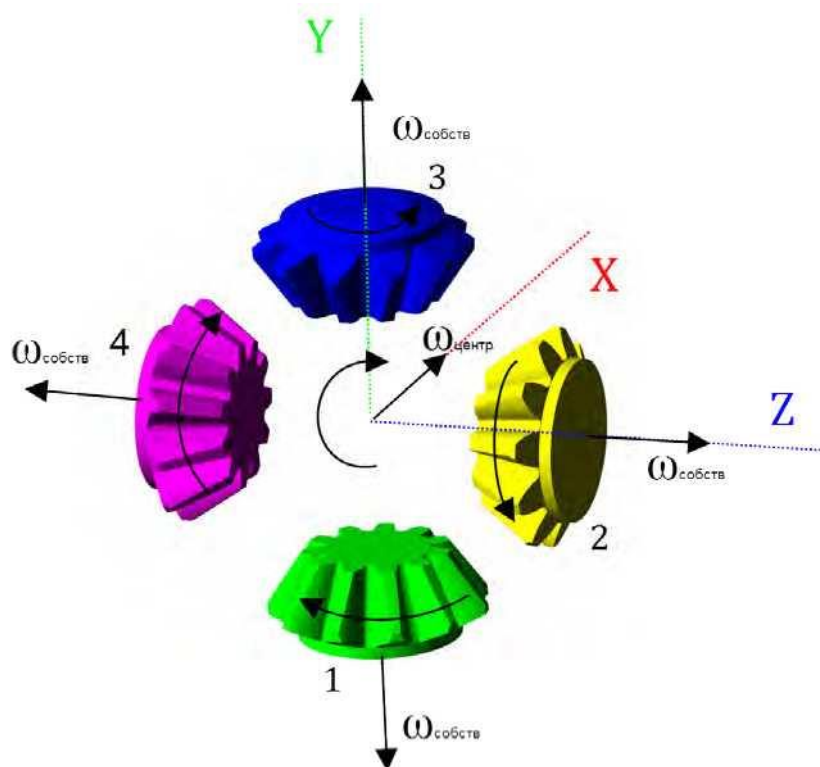


Рисунок 5 – Система координат и векторы скорости сателлитов

Таким образом, для каждого сателлита мгновенный вектор угловой скорости представляет собой векторную сумму  $\omega_{\text{собств}}$  и  $\omega_{\text{центр}}$  (рисунок 6).

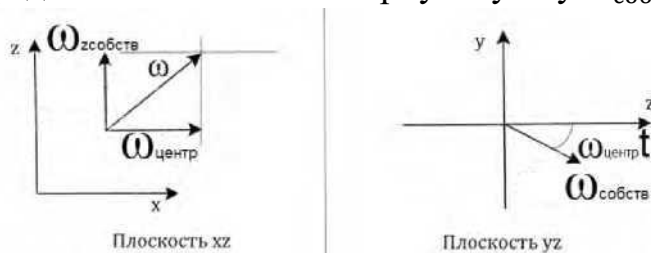


Рисунок 6 – Разложение мгновенного вектора вращения на составляющие для сателлита 2

Суммарный вектор вращения одного спутника обозначим  $\omega$ . Из рисунка 6 (плоскость  $XZ$ ) проекция на ось  $X$  вектора  $\omega$  для всех спутников в любой момент времени равна  $\omega_{\text{центр}}$ . Проекция вектора  $\omega$  на плоскость  $YZ$  будет равна  $\omega_{\text{собств}}$ . Перейдём к рассмотрению проекции вектора  $\omega$  на оси  $Y$  и  $Z$ . Вектор  $\omega_{\text{собств}}$  вращается с частотой  $\omega_{\text{центр}}$  вокруг центра координат плоскости  $YZ$ . Угол поворота в момент времени  $t$  равен  $\omega_{\text{центр}} \cdot t$ . Соответственно, проецируя вектор  $\omega_{\text{собств}}$  на оси  $Y$  и  $Z$ , для компонент вектора  $\omega$  получаем следующие соотношения:

$$\begin{cases} \omega_x = \omega_{\text{центр}}, \\ \omega_y = \omega_{\text{собств}} \sin(-\omega_{\text{центр}} t), \\ \omega_z = \omega_{\text{собств}} \cos(-\omega_{\text{центр}} t). \end{cases}$$

Остальные спутники имеют схожие выражения для угловой скорости, учитывающие начальные положения спутников. Частоты вращения подвижных элементов, с учётом передаточных чисел зубчатых зацеплений, для исследуемых режимов работы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Частоты вращения подвижных элементов

Элемент	Частота вращения (вокруг своей оси), об/мин	
	Режимы 1, 2	Режим 3
Ведущее колесо ( $\omega_z$ )	2500	1600
Центральное колесо ( $\omega_x$ )	1209,68	774,2
Первая полуось ( $\omega_x$ )	1209,68	516,13
Вторая полуось ( $\omega_x$ )	1209,68	1032,26
Спутники ( $\omega_{\text{собств}}$ )	0	516,13
Подшипники ( $\omega_x$ )	1035,3	331,3

### 3.4. Течение в узких зазорах зубчатых зацеплений

Для моделирования течения масла в узких каналах вблизи зацеплений зубчатых колёс (см. рисунок 7) применялась модель «зазора», позволяющая получить с удовлетворительной точностью решение без построения в этих каналах подробной расчётной сетки.

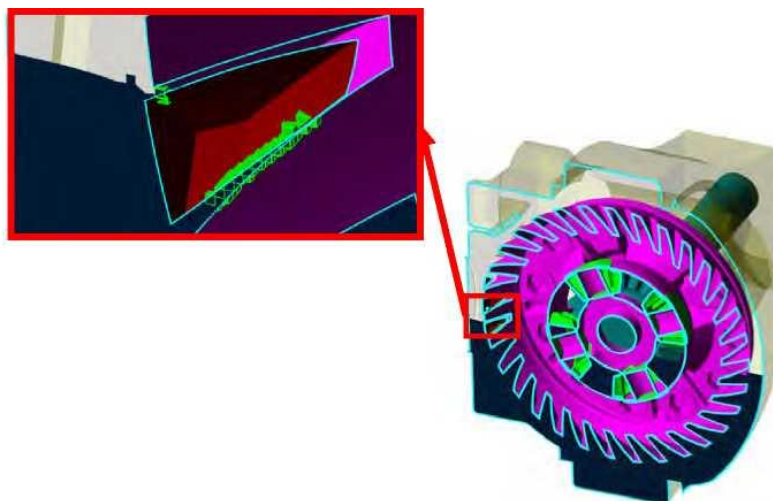


Рисунок 7 – Ячейки вблизи зацеплений ведущего и центрального колёс

Модель «зазора» используется только в тех ячейках (см. рисунок 8, ячейки определяются программой автоматически), в которых выполняются следующие условия:

- в ячейке находятся две образующие зазор поверхности;
- в ячейке находится одна образующая зазор поверхность, а вторая поверхность находится в соседней к ней ячейке;
- обе поверхности принадлежат разным граничным условиям, каждое из которых имеет тип «Стенка»;
- расстояние между образующими зазор поверхностями должно находиться в диапазоне между максимальным и минимальным значениями, заданными пользователем; в данном исследовании максимальное значение равнялось 0,1 мм, а минимальное - 0,001 мм;
- угол  $\alpha$  между нормальными к этим поверхностям изменяется в диапазоне от 120 до 180 градусов (см. рисунок 9).

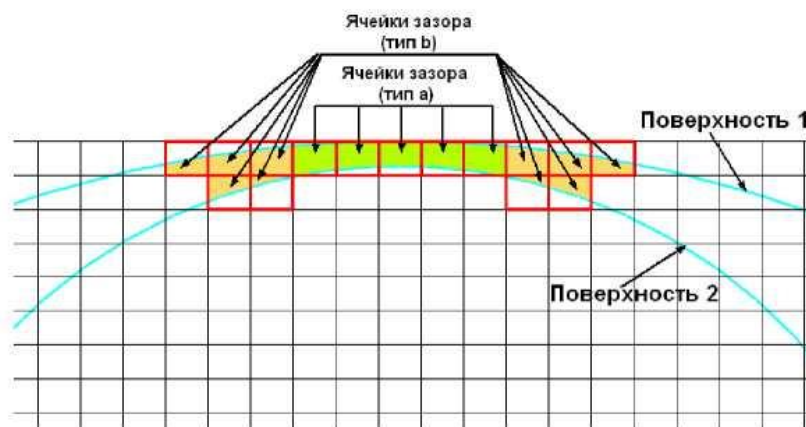


Рисунок 8 – Ячейки зазора между двумя поверхностями

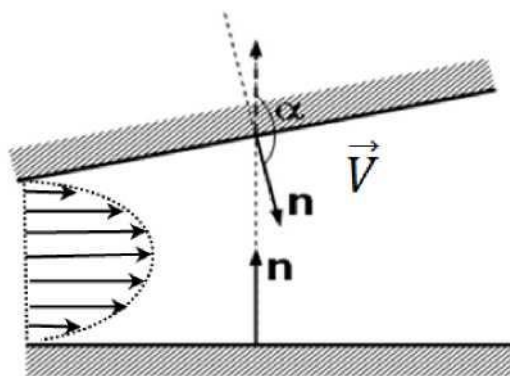


Рисунок 9 – Угол между нормальными к образующим зазор поверхностям

Стандартная модель «зазора», реализованная в FlowVision, допускает внутри зазора использование течения Пуазейля.

### 3.5. Граничные условия

На всех стенках конструкции фрагмента картера ведущего моста и поверхностях вращающихся элементов задано условие прилипания и непротекания.

### 3.6. Расчётная сетка

В расчётах использовалась равномерная начальная расчётная сетка с ячейками в форме куба со стороной 10 мм (см. рисунок 10).

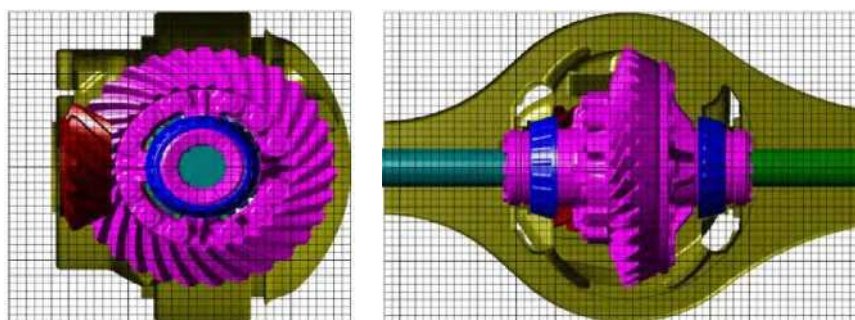


Рисунок 10 – Начальная расчётная сетка

Для более детального разрешения течения вблизи стенок конструкции картера линейные размеры расчётных ячеек сетки были уменьшены в 4 раза (адаптация расчётной сетки второго уровня по поверхности стенок), т.е. ячейки, непосредственно прилегающие к стенке, имели размер около 2,5 мм. Толщина «слоя» из этих ячеек вблизи стенок составила 4 ячейки. Адаптация ячеек расчётной сетки, прилегающих к поверхностям вращающихся элементов картера, проведена до третьего уровня – размер ячеек 1,25 мм. До такого же уровня адаптации были измельчены расчётные ячейки в выделенных объёмах картера около ведущего и центрального колёс.

Вид результирующей расчётной сетки в начальный момент времени представлен на рисунке 11.



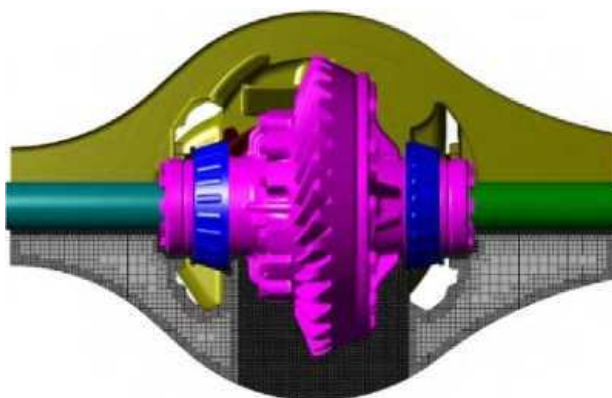


Рисунок 11 – Вид расчётной сетки в начальный момент времени

В ходе моделирования по мере распространения масла в объёме картера расчётная сетка и количество расчётных ячеек изменялись. Общее количество ячеек при этом составляло порядка 3,5 млн.

#### 4. Результаты моделирования

Результаты моделирования гидродинамических процессов во фрагменте картера моста приведены в виде изменения распределения масла во всем исследуемом объёме. Общее время расчёта каждого режима соответствует 5 оборотам центрального колеса. Этот отрезок времени принят достаточным для оценки распределения масла в картере моста по деталям.

##### 4.1. Режим 1

Результаты моделирования режима 1 показывают (рисунок 12), что масло

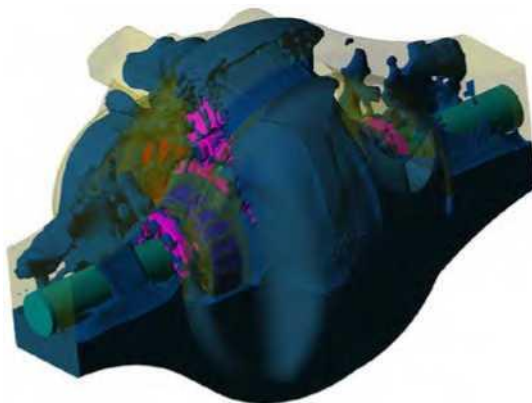


Рисунок 12 – Распределение масла в расчётной области (режим 1)

под действием вращающихся деталей распределяется по стенкам корпуса и по зубьям центрального и ведущего колёс. Большая часть масла из-за высокой вязкости прилипает и движется вдоль стенок корпуса.

Со стенок корпуса масло практически не перемещается в область дифференциала. Расположенное в области дифференциала масло представляет собой остатки объёма масла, занимаемого в начальный момент времени.

В качестве иллюстрации на рисунке 13 дополнительно представлено распределение масла в сечении расчётной области плоскостью.

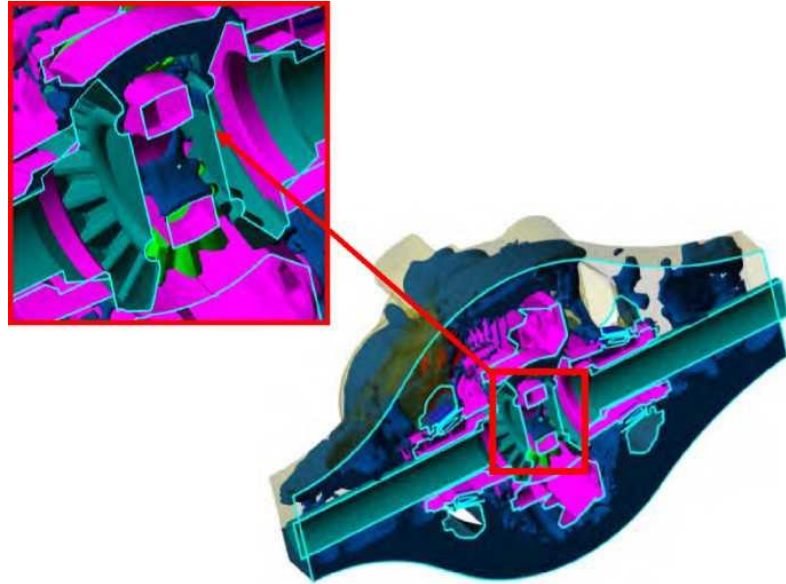


Рисунок 13 – Распределение масла в сечении расчётной области (режим 1)

На данном режиме работы масло в область сателлитов практически не поступает.

#### 4.2. Режим 2

Для более корректной оценки попадания масла на сателлиты в режимах 2 и 3 расчёт первых двух оборотов центрального колеса был проведён с перекрытием области дифференциала (см. рисунок 14). Это обеспечило отсутствие масла в этой области в начальный момент и непротекание в неё в течение первых двух оборотов центрального колеса. Начиная с третьего оборота центрального колеса, перекрытие убиралось и масло могло поступать в область дифференциала.

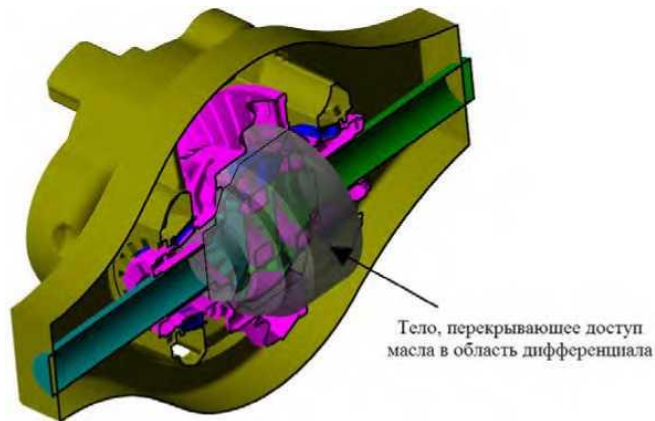


Рисунок 14 – Перекрытие части области дифференциала

Результаты моделирования режима 2 свидетельствуют о более интенсивном разбрызгивании масла вращающимися ведущим и центральным колёсами по сравнению с режимом 1 (рисунок 15).

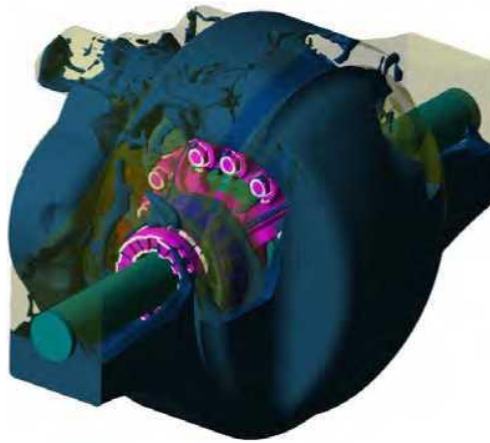


Рисунок 15 – Распределение масла в расчётной области (режим 2)

На рисунке 16 представлено распределение масла в сечении расчётной области плоскостью.

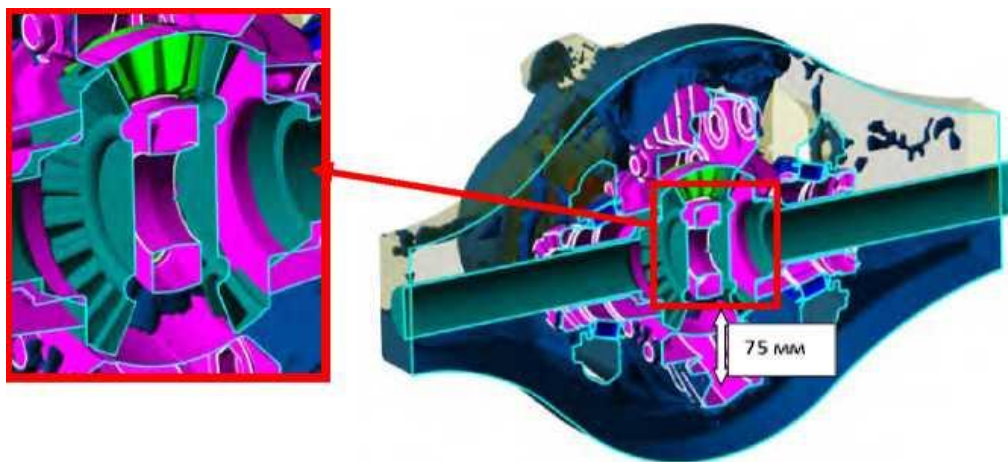


Рисунок 16 – Распределение масла в сечении расчётной области (режим 2)

На рисунке 17 представлено распределение масла на поверхностях сателлитов после вращения центрального колеса на 5 оборотов.

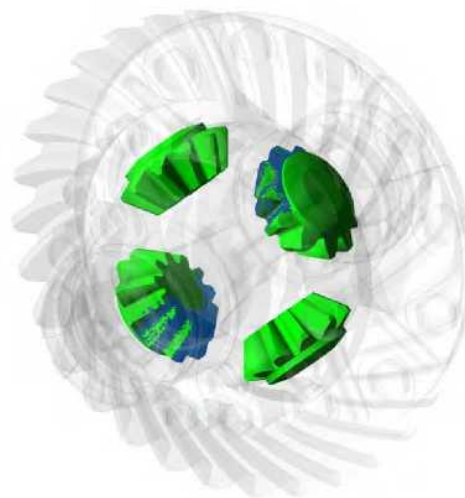


Рисунок 17 – Распределение масла на поверхностях сателлитов (режим 2)

После 5 оборотов центрального колеса незначительный объем масла попадает в область дифференциала, смазывая лишь часть поверхности двух сателлитов.

Основная масса масла, как и в режиме 1, располагается на стенках корпуса, центральном и ведущем колёсах и на поверхности подшипников. Расстояние от уровня масла до окон центрального колеса составляет порядка 75 мм (см. рисунок 16). Это свидетельствует о том, что масло в область дифференциала не поступает в достаточном объёме, а попадает только в виде брызг.

Сравнительный анализ результатов моделирования с предыдущим вариантом расчета показал, что увеличение температуры на рассматриваемом режиме не приводит к существенному изменению в распределении масла в области расположения сателлитов.

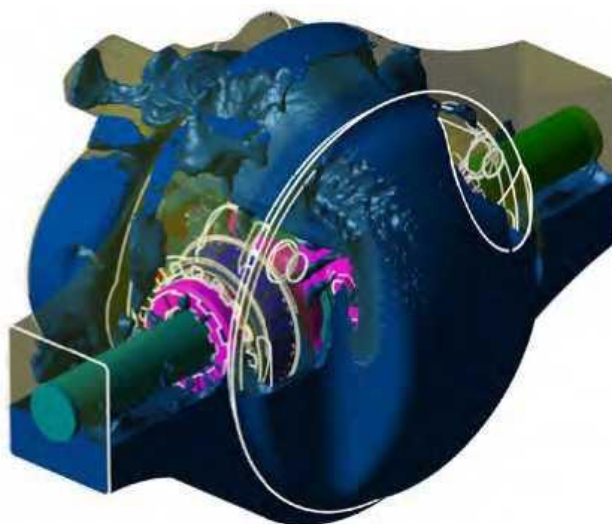


Рисунок 18 – Распределение масла в расчётной области (режим 3)

### 4.3. Режим 3

Результаты моделирования режима 3 показывают, что основная часть масла, как и в предыдущих режимах, располагается на стенках корпуса, центральном и ведущем колёсах и на поверхности подшипников (рисунок 18). Из-за более низкой скорости вращения в область дифференциала попадает гораздо больший объём масла по сравнению с режимом 2 (рисунок 19).

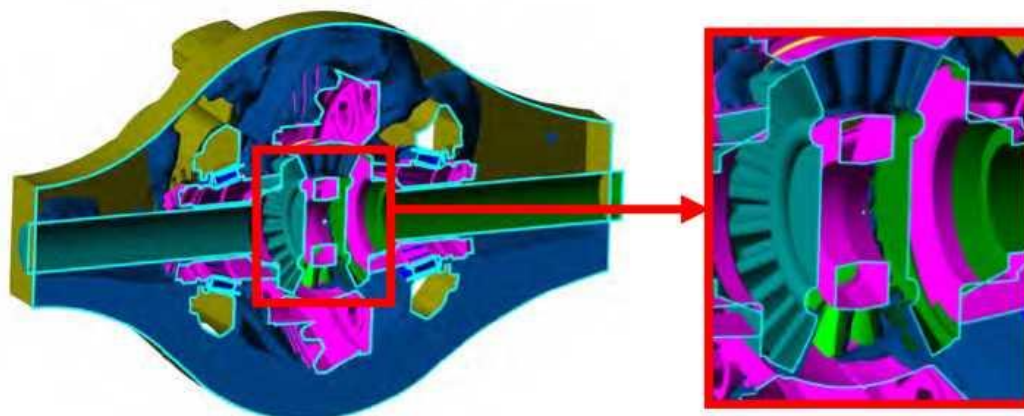


Рисунок 19 – Распределение масла с рассечением расчётной области (режим 3)

Из-за вращения сателлитов вокруг своей оси, масло распространяется по всей их поверхности, что говорит о более качественном смазывании этих элементов конструкции (рисунок 20).

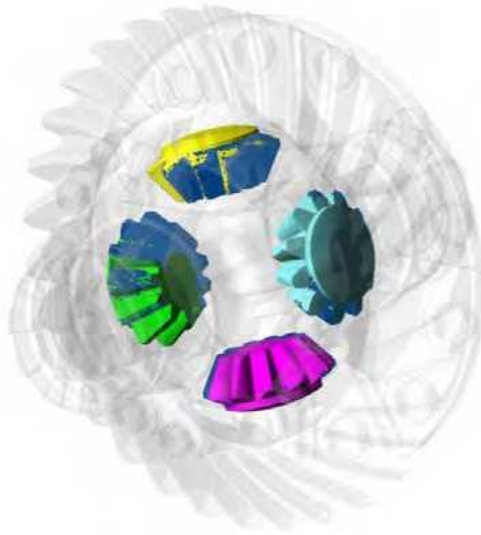


Рисунок 20 – Распределение масла на поверхностях сателлитов (режим 3)

Результаты моделирования показали, что уменьшение угловой скорости ведущего и центрального колёс и наличие вращения сателлитов вокруг собственной оси приводят к заметному изменению в распределении масла в области расположения сателлитов, что приводит к более эффективному их смазыванию по сравнению с режимами 1 и 2.

### **Заключение**

Разработана методика компьютерного моделирования гидродинамических процессов во фрагменте картера ведущего моста автомобиля семейства «КАМАЗ» в программном комплексе FlowVision. С использованием методики исследованы три режима работы, позволяющие оценить влияние частоты вращения ведущего колеса, температуры масла и частот вращения полуосей на процесс смазывания сателлитов.

Расчётная модель фрагмента картера ведущего моста разработана с учётом изменения границы раздела «трансмиссионное масло – внешняя среда» под действием сложного движения вращающихся элементов и поля силы тяжести.

Полученное в результате моделирования распределение масла в исследуемом объёме картера и анализ картины его течения показали, что на режимах 1 и 2 работы проникающий в область дифференциала объём масла не обеспечивает эффективную смазку его элементов. В режиме 3 наблюдается более эффективное смазывание сателлитов.

С целью верификации разработанной методики исследований запланированы натурные испытания образца изделия.

Анализ полученных с помощью разработанной методики результатов свидетельствует о возможности применения программного комплекса FlowVision для исследования гидродинамических процессов во фрагменте картера ведущего моста.

Для оценки влияния вязкостно-температурных характеристик масла на смазываемость деталей ведущего моста при различных скоростных, нагрузочных и температурных режимах потребуются дополнительные

расчетные исследования с использованием разработанной верифицированной методики.

Список литературы:

1. Яскевич, З. Ведущие мосты / Пер. с польск. Г.В. Коршунова. – М.: Машиностроение, 1985. – 600 с.: ил.
2. Испытательный стенд для исследования условий работы механизмов ведущего моста грузового автомобиля / А.С. Горобцов, А.А. Долотов, Е.В. Клементьев, М.В. Ляшенко, П.В. Потапов, В.В. Шеховцов // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 11. - Волгоград, 2015. - № 5 (165). - С. 10-13.
3. Математическая модель принудительных систем смазки сельскохозяйственных машин и оборудования / О.Л. Маломыжев, Н.Е. Федотова, И.С. Медведева, И.С. Прокопьев // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 4. - С. 48-51.
4. Метод расчета подач масла к деталям агрегатов сельскохозяйственных машин / О.Л. Маломыжев, Н.Е. Федотова, В.В. Скутельник //Тракторы и сельхозмашины. – 2016. - №12. – С.19-22.
5. Расчет расходов масла в агрегатах трансмиссий энергонасыщенных тракторов сельскохозяйственного назначения с принудительной системой смазки / С.Н. Шуханов, О.Л. Маломыжев, Н.Е. Федотова // Вестник АПК Верхневолжья. – 2017. - №2. – С.75-78.
6. Jinning Li, Zeyu Ma, Ming Jiang, Yunqing Zhang and LiWan. Optimized design of the flow network in the lubrication system for the heavy vehicle transmission. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, Vol. 9(4) 1–16.
7. Qianlei Peng, Liangjin Gui & Zijie Fan. Numerical and experimental investigation of splashing oil flow in a hypoid gearbox. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 2018, vol. 12, no. 1, 324–333.