

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ И КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КЛИНОВОЙ ЗАДВИЖКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ FSI-РАСЧЕТОВ

УДК 621.646

THE INTERACTION ANALYSIS OF THE WORKING MEDIUM AND
STRUCTURAL ELEMENTS OF THE WEDGE BOLT WITH THE APPLICATION OF
FSI-CALCULATIONS

**Закирничная М. М.,
Кульшарипов И. М.**
Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

**M. M. Zakirnichnaya,
I. M. Kulsharipov**
Ufa State Petroleum Technological
University, Ufa, the Russian Federation

Проведен анализ взаимодействия рабочей среды и конструктивных элементов клиновой задвижки 3КЛ2 250-25 с учетом влияния технологических параметров потока на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов клиновых задвижек с использованием программных комплексов (ПК) ABAQUS и FLOWVISION с применением расчетов по технологии FSI (Fluid-structureinteraction–взаимодействие «жидкость-конструкция») в процессе закрытия запорного органа – клина. Определены основные параметры, влияющие на срок службы конструктивных элементов запорной арматуры.

На первом этапе были проведены FSI-расчеты клиновой задвижки 3КЛ2 250-25 (Du– 250 мм, Ру – 2,5 МПа) с использованием возможностей ПК FLOWVISION и ABAQUS в процессе перемещения клина и движения потока жидкости. В ПК ABAQUS был подготовлен рабочий проект для перемещения клина: импортирована модель клина, присвоен материал (сталь 20Л), заданы граничные условия, произведено разбиение на конечные элементы, задана интерфейсная поверхность, сгенерирован INP-файл. В ПК FLOWVISION была подготовлена модель прохождения жидкости (мазута) через проточную часть клиновой задвижки 3КЛ2 250-25, импортирован клин в качестве подвижного тела, построена конечно-разностная сетка. На входе в проточную часть задавалось давление 1, 1,6 и 2,5 МПа.

После окончания расчетов был получен ODB-файл для ПК ABAQUS, в котором содержится информация о перемещении клина и его деформациях в состояниях от полного открытия проходного сечения задвижки до полного его перекрытия клином. В результате для рабочей среды мазута при температуре 100 °С и давлениях 1, 1,6 и 2,5 МПа были получены напряжения, возникающие в зацепах клина, максимальные значения которых составили 92, 155 и 246 МПа, соответственно. Полученные значения напряжений при перемещении клина в дальнейшем, возможно использовать для расчета срока службы клиновых задвижек.

The interaction analysis of the working medium and structural elements of the wedge bolt 3KL2 250-25 taking into account the flow technological parameters upon the stress-deformed state of the wedge bolts' structural elements with the application of the program complex (PC) ABAQUS and FLOWVISION with the application of calculations on FSI technology (Fluidstructureinteraction – the interaction "fluid-structure") in the process of the locking body- the wedge closing has been carried out. The main parameters have been defined which influence upon the service life of the locking fittings' structural elements.

In the first stage FSI-calculations of the wedge bolt 3KL2 250-25 (Du-250 mm, Ru-2.5 MPa) with the application of PC FLOWVISION and ABAQUS capabilities in the process of the wedge displacement and the fluid flow movement were conducted. In PC ABAQUS the working project for the wedge displacement was prepared: the wedge model was imported, the material was provided (steel 20L), boundary conditions were specified, the decomposition into the final elements was performed, the interface surface was specified, the INP-file was generated. In PC FLOWVISION the model of fluid (heating oil) passage through the flow part of the wedge bolt 3KL2 250-25 was prepared, the wedge as a moving body was imported, the final calculation net was constructed. On the entrance into the flow part the pressure 1, 1.6 and 2.5 MPa was specified.

After the termination of the calculations, the ODB-file for PC ABAQUS was obtained in which there's information about the wedge displacement and its deformations in the state from the complete opening of the passage section of the bolt up to its overlapping by the wedge. As a result, for the heating oil working medium at the temperature 100 °C and the pressures 1, 1.6 and 2.5 MPa, the stresses arising in the wedge cams were obtained the maximum values of which were 92, 155 and 246 MPa, respectively. The values of the stresses obtained with the wedge displacement further on may be used for the service life calculation of the wedge bolts.

Ключевые слова: клиновая задвижка, напряженно-деформированное состояние, срок службы, метод конечных элементов, метод конечных разностей, ABAQUS, FLOWVISION, FSI.

Key words: wedge gate valve, stress-strain state, life, finite element method, finite difference method, ABAQUS, FLOWVISION, FSI.

Запорная арматура наряду с другими конструктивными элементами технологических трубопроводов широко используется на нефтеперерабатывающих заводах и в нефтегазовой отрасли в целом.

Анализ статистических данных на примере одного из нефтеперерабатывающих заводов показал, что количество отказов клиновых задвижек высоко независимо от их типоразмеров (рисунок 1). Отказы происходят ранее окончания запланированного срока службы в связи с тем, что заводы-изготовители в сопроводительной документации указывают срок службы арматуры, определяемый для расчетных параметров: температура среды 20 °С, рабочая среда – вода. Проектным организациям, включающим запорную арматуру в трубопроводные системы, необходимо уточнять срок службы для рабочих

условий эксплуатации. Однако, в связи с отсутствием стандартных методик расчета ресурса запорной арматуры с учетом рабочих параметров, подобные расчеты достаточно трудоемки и не проводятся. Соответственно в ведомость трубопроводов заносится срок службы арматуры согласно рекомендациям завода-изготовителя.

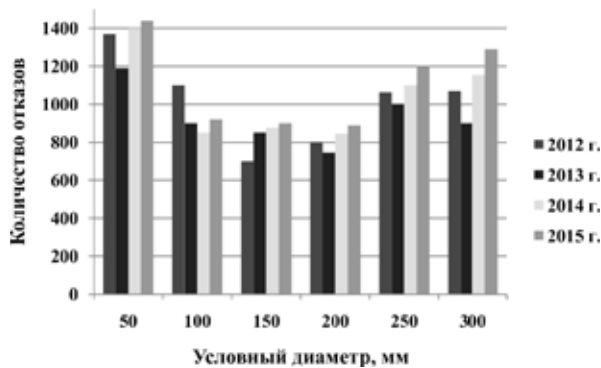


Рисунок 1. Динамика отказов клиновых задвижек на примере одного из нефтеперерабатывающих заводов

В связи с этим существует необходимость определения срока службы арматуры с учетом рабочих параметров. В результате исследований [1-3] было установлено, что на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструктивных элементов клиновых задвижек (клин, уплотнительные кольца) существенно влияют технологические параметры транспортируемого потока, в том числе скорость потока, давление в системе и температура. Так в [2] были получены зависимости максимальных эквивалентных напряжений на зацепах клина от степени открытия проходного сечения клиновой задвижки ЗКЛ2 200-160 ХЛ1 для рабочей среды – вакуумный газойль (рисунок 2). Исходя из полученных данных, было установлено, что максимальные эквивалентные напряжения возникают в области зацепов клина при степени открытия проходного сечения на 5% [2]. Результаты расчетов НДС, полученные для задвижки ЗКЛ2 250-25, показали аналогичный характер зависимости максимальных эквивалентных напряжений в области зацепов клина от степени открытия проходного сечения.

Увеличение температуры среды незначительно влияет на НДС конструктивных элементов, однако, при этом снижаются допускаемые напряжения в металле, из-за чего существенно снижается установленный заводом-изготовителем диапазон рабочих давлений. Для задвижки с условным давлением 2,5 МПа диапазон рабочих давлений снижается с 2,15 МПа при 100 °С до 1,6 МПа при 300 °С при скорости потока 5 м/с [3]. Соответствие зон максимальных эквивалентных напряжений картине реального разрушения зацепов клина позволяет верифицировать расчетную модель (рисунок 3).

До настоящего времени оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов клиновой задвижки с учетом гидродинамики потока жидкости [1,3] проводилась при помощи последовательных расчетов гидродинамики и напряженно-деформированного состояния путем нахождения нагрузки на конструктивные элементы от воздействия потока среды в программном комплексе (ПК) FLOWVISION и дальнейшим приложением этой нагрузки в ПК ABAQUS в статической постановке. Недостатком подобной постановки задачи является то, что она не учитывает неравномерное распределение давления от потока среды на клин в процессе перемещения.

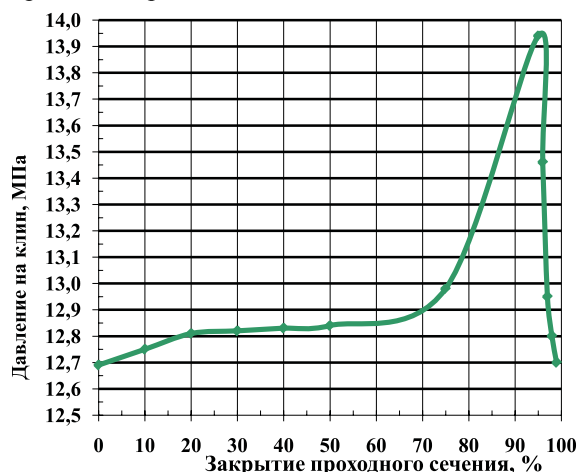


Рисунок 2. Зависимости давления на клин от открытия проходного сечения при скорости потока 8 м/с для задвижки ЗКЛ 2 200-160



Рисунок 3. а - соответствие зон разрушения в области зацепов клина; б - картина распределения максимальных эквивалентных напряжений

Поэтому цель данной работы – оценка НДС конструктивных элементов клиновой задвижки с учетом гидродинамики потока жидкости в процессе перемещения клина с применением FSI-расчетов (Fluid-StructureInteraction – взаимодействие жидкости и конструкции) в динамике и сравнение с ранее полученными результатами. В качестве объекта исследований выбрана задвижка ЗКЛ2 250-25 (задвижка клиновая литая, условный диаметр – 250 мм, условное давление – 2,5 МПа), для которой ранее были проведены расчеты НДС под действием статической нагрузки для различных положений запорного органа – клина.

Разработка 3D-моделей конструктивных элементов (клин и уплотнительные кольца) и проточной части задвижки производилась по чертежам одного из заводов-изготовителей трубопроводной арматуры с использованием ПК SOLIDWORKS. В качестве примера на рисунке 4 представлена 3D-модель сборки клина и уплотнительных колец клиновой задвижки ЗКЛ2 250-25, в которой клин расположен в положении, обеспечивающем беспрепятственное прохождение рабочей среды через проточную часть клиновой задвижки («открыто»). На рисунке 5 представлена 3D-модель проточной части задвижки ЗКЛ2 250-25. Для изучения влияния эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние задвижки ЗКЛ2 250-25 технические характеристики принимались согласно каталогу этого же завода-изготовителя.

Для проведения FSI-расчетов применялись ПК FLOWVISION и ABAQUS. ПК FLOWVISION предназначен для численного моделирования трехмерных ламинарных и турбулентных, стационарных

и нестационарных течений жидкости и газа и активно применяется для решения задач моделирования гидродинамики нефтеперерабатывающих производств [4-7]. ABAQUS – универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности. С помощью ПК ABAQUS возможно анализировать НДС различных типов оборудования нефтегазопереработки и его конструктивных элементов при различных режимах нагружения и получать результаты близкие к реальным условиям эксплуатации [8-12].

Перемещение клина и его деформация моделировались в ПК ABAQUS. Движение транспортируемой среды моделировалось в ПК FLOWVISION. Взаимосвязь пакетов программ осуществлялась через MP-менеджер.

Для того чтобы произвести расчеты необходимо предварительно подготовить проект в обоих программных комплексах.

В ПК ABAQUS импортировалась геометрия подвижной части клиновой задвижки – клина. После импорта геометрии клина в модуле PROPERTY задавались физико-механические свойства материала – стали 20Л, из которого изготовлен клин (таблица 1).

Граничные условия (условия закрепления) в области зацепов клина типа «DISPLACEMENT/ROTATION» (перемещение и вращение) $U1 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$, а также перемещение $U2 = -0,287$ – расстояние, необходимое для закрытия проточной части, были заданы в модуле LOAD.

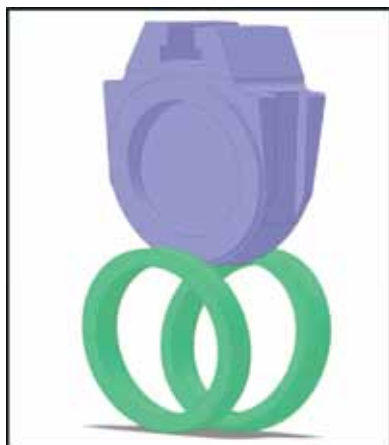


Рисунок 4. 3D-модель сборки клина и уплотнительных колец клиновой задвижки ЗКЛ2 250-25 (открытие клина на 100%)



Рисунок 5. 3D-модель проточной части клиновой задвижки ЗКЛ2 250-25

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 20Л

Температура, °С	Модуль упругости материала, кН/мм ²	Плотность материала, кг/м ³
20	201	7850
100	196	7834
200	188	7803
300	183	7770

Интерфейсная поверхность, необходимая при совместном расчете, была задана на всей поверхности клина в модуле ASSEMBLY.

При построении сетки, которая значительно влияет на результаты расчетов был определен минимальный размер элемента и выбран тип объемного элемента – тетраэдрический, поскольку клин имеет сложную конфигурацию (модуль MESH).

Далее проводился предварительный расчет, результатом которого являлось перемещение клина по вертикали на расстояние от полного открытия до полного закрытия проходного сечения задвижки и также был сгенерирован INP-файл, содержащий координаты узлов конечно-элементной сетки, представляющей подвижное тело.

Следующим этапом расчета являлась подготовка проекта в ПК FLOWVISION куда была импортирована 3D-модель проточной части клиновой задвижки. Были заданы вещество – мазут, физическая модель – несжимаемая жидкость, граничные условия – вход, выход, стенка, импортировано подвижное тело – клин – на основе INP-файла, полученного в результате предварительного расчета в ПК ABAQUS, создана конечно-разностная расчетная сетка.

Для идентификации совместного расчета со стороны программой в INP-файл проекта ПК ABAQUS в раздел STEP были добавлены соответствующие строки.

Далее подготовленные файлы проектов запускались на расчет с помощью приложения MP-менеджер, в котором указывались пути к расчетным файлам, выбирался шаг обмена между программными комплексами. Ход расчета отслеживался с помощью приложения «Модуль просмотра результатов», позволяющего визуализировать процесс расчета с точки зрения гидродинамики потока жидкости в ходе движения запорного органа – клина.

В качестве примера на рисунке 6 представлены поля распределения давления по поверхности клина, линии тока рабочей жидкости и векторы скорости, которые можно отслеживать в ходе расчета. Характер распределения давления на поверхности клина, а также линии тока жидкости соответствуют результатам предыдущих исследований.

После завершения процесса расчета был получен обновленный ODB-файл проекта ПК ABAQUS, в котором записаны деформации и напряжения, которые действуют на клин в процессе закрытия задвижки. Эти значения можно визуализировать в модуле VISUALIZATION. На рисунке 7 представлена модель клина с максимальными эквивалентными напряжениями, возникающими в процессе закрытия задвижки.

Для сравнения результатов были проведены расчеты НДС при температуре среды 100 градусов и рабочем давлении 1, 1,6 и 2,5 МПа. В качестве рабочей среды был выбран мазут. Расчеты НДС с использованием FSI показали, что характер распределения напряжений на клине схожий с результатами ранее проведенных исследований (рисунок 8): основная концентрация эквивалентных напряжений приходится на регионы в области зацепов клина. Однако значения напряжений в этой области значительно отличаются, чем при расчетах со статичным положением клина и статичной нагрузкой. Так, при расчетах в статике максимальные эквивалентные напряжения при рабочем давлении 2,5 МПа равны 182,3 МПа, при рабочем давлении 1,6 МПа – 147,7 МПа, при рабочем давлении 1 МПа – 120 МПа. В то же время при FSI-расчетах при рабочем давлении 2,5, 1,6 и 1,0 МПа максимальные эквивалентные напряжения в области зацепов клина равны 246, 155 и 92 МПа соответственно.

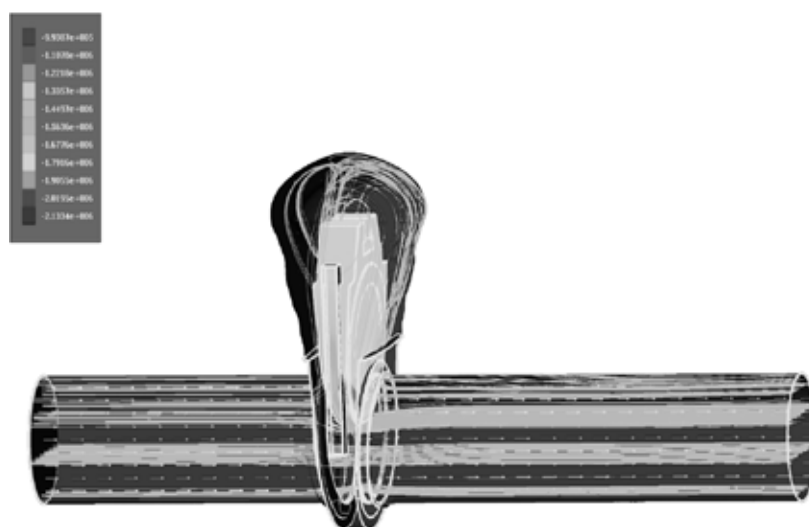


Рисунок 6. Линии тока рабочей жидкости и распределение давления на поверхности клина в ходе расчета при 30% закрытия проходного сечения

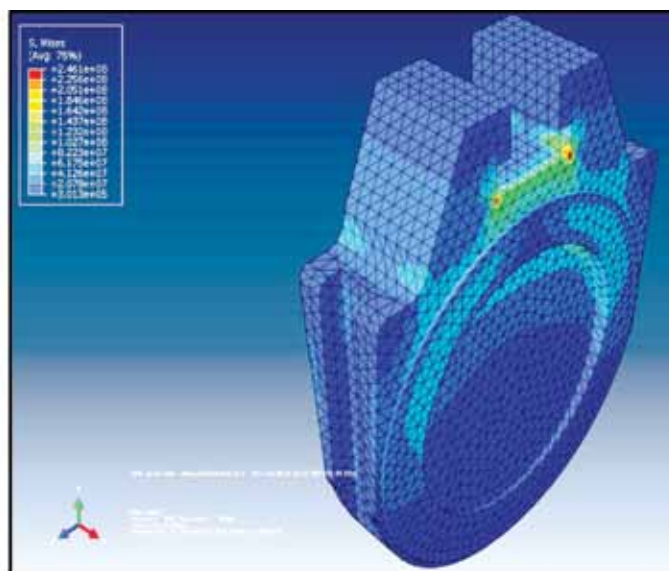


Рисунок 7. Распределение эквивалентных напряжений на поверхности клина при рабочем давлении 2,5 МПа

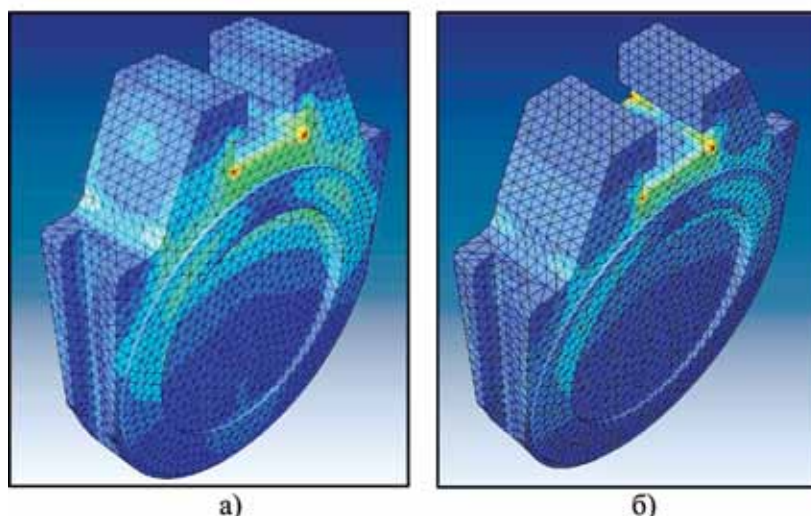


Рисунок 8. Картина распределения эквивалентных напряжений при а) статическом расчете и б) FSI-расчете клиновой задвижки ЗКЛ2250-25 при температуре 100 градусов и рабочем давлении 2,5 МПа

Выводы

Это позволяет сделать вывод о том, что при расчете НДС конструктивных элементов клиновых задвижек необходимо учитывать не только рабочие параметры и положение клина, но и неравномер-

ность распределения нагрузки от давления потока жидкости по поверхности клина.

В результате расчетов был получен цикл нагружения клина, записанный в ODB-файл, который в дальнейшем планируется использовать для определения количества циклов до разрушения.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Закирничная М. М., Чернова А. Ю., Кульшарипов И. М. Оценка влияния технологических параметров потока на остаточный ресурс задвижки ЗКЛ2 300-25// Нефтегазопереработка –2015: материалы междунар. науч.-практ. конф./ ГУП «Институт нефтехимпереработки РБ». Уфа, 2015. С. 259-260.

2 Иванова Е. И., Закирничная М. М. Влияние местного сопротивления в виде

запорной арматуры на изменение гидродинамики потока в трубопроводе // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 4, № 2. С. 64-70.

3 Закирничная М. М., Кульшарипов И. М. Применение современных программных комплексов при моделировании гидродинамических процессов в проточной части клиновых задвижек// Химическая техника. 2012. № 4. С. 16.

4 Иванова Е. И., Закирничная М. М. Моделирование течения потока газа через

задвижку ЗКЛ2-150-40 при различных положениях клина //Мировое сообщество: проблемы и пути решения. Уфа, 2007. С. 53-55.

5 Закирничная М. М., Гатин Р. Н., Белова Е. О. Анализ уровня дополнительной нагрузки в зоне ввода сырья ректификационной колонны при учете гидродинамики // Нефтегазовое дело. 2007. Т. 5, № 2. С. 134-136.

6 Особенности моделирования газодинамики потока метана с абразивными

частицами в трубопроводе с использованием ПК FLOWVISION/ М. М. Закирничная, И. Ю. Адеев, Т. И. Передерей, Г. Ф. Исанчурин // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2015: сб. науч. ст. 4-й /Междунар. молодежной науч. конф. Курск, 2015. С. 111-117.

7 Дементьев В. А., Закирничная М. М. Изучение газодинамики движения среды в шлемовом трубопроводе отпарной колонны с использованием программы FLOWVISION// Мировое сообщество: проблемы и пути решения. Уфа: 2007. С. 259.

8 Прогнозирование усталостной прочности рабочих колес центробежных насосных агрегатов с помощью решений SIMULIA: ABAQUS, FE-SAFE и комплекса гидродинамического анализа FLOWVISION/ С. Тропкин, А. Девятков, А. Винклер, Р. Тляшева, М. Закирничная // САПР и графика. 2014. № 5 (211). С. 60-64.

9 Закирничная М. М., Девятков А. Р. Прогнозирование долговечности рабочих колес центробежных насосных агрегатов при перекачивании тяжелых нефтепродуктов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. /УГНТУ. 2011. № 6. С. 420-438. URL: http://ogbus.ru/authors/Zakirnichnaya/Zakirnichnaya_3.pdf

10 Zakirnichnaya M. M., Devyatov A. R. Impellers operation life evaluation of centrifugal pump units // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2010. № 2. С. 50. URL: http://ogbus.ru/authors/Zakirnichnaya/Zakirnichnaya_2.pdf

11 Закирничная М. М., Гатин Р. Н. Определение допускаемой нагрузки на штуцера с учетом общего напряженно-деформированного состояния колонного аппарата // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. Т. 3, № 2 (35). С. 35-39.

12 Закирничная М. М., Сулейманов М. Р. Изучение напряженно-деформированного состояния рабочей части центробежных насосных агрегатов// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2007. № 5. С. 84-88.

REFERENCES

1 Zakirnichnaya M. M., Chernova A. Yu., Kulsharipov I. M. [Assessing the impact of technological parameters of flow on residual life of the valve 3KJ12 300-2]. *Neftegazopererabotka – 2015: Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. GUP Institut neftehimpererabotki RB*. [Oil and gas processing - 2015 oil and gas processing: proceedings of the international. scientific.-pract. Conf.] Ufa, 2015, pp. 259-260. [in Russian].

2 Ivanova E. I., Zakirnichnaya M. M. The Influence of local resistance in the form of valves to change the hydrodynamics of the flow in the pipeline. *Neftegazovoe delo. Oil and gas business, 2006*, Vol. 4, no. 2. P. 64-70. [in Russian].

3 Zakirnichnaya M. M., Kulsharipov I. M. The Use of modern program complexes in the simulation of hydrodynamic processes in a flowing part of wedge gate valves. *Himicheskaya tehnika - Chemical engineering*, 2012. no. 4. p. 16. [in Russian].

4 Ivanova E. I., Zakirnichnaya M. M. Modeling of flow of gas through the valve 3KJ12-150-40 at different positions of the wedge. *Mirovye soobschestvo: problemy i puti resheniya - The Global community: problems and solutions*. Ufa, 2007, pp. 53-55. [in Russian].

5 Zakirnichnaya M. M., Gatin R. N., Belova E. O. The Analysis of the level of extra load in the area of input raw materials in the distillation column, taking into account fluid dynamics. *Neftegazovoe delo - Oil and gas business*, 2007, Vol. 5, no. 2. pp. 134-136. [in Russian].

6 Zakirnichnaya M. M., Adeev I. Yu, Perederey T. I., Isanchurina G. F.

[Modeling of dynamics of methane flux with abrasive particles in pipeline using the PC FLOWVISION]. *Pokolenie buduschego: Vzglyad molodykh uchennykh – 2015: sb. nauch. st. 4-y Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf.* [The generation of the future: a View of young scientists – 2015: sat. scientific. article 4-th Intern. youth scientific. Conf]. Kursk, 2015. pp. 111-117. [in Russian].

7 Dementev V. A., Zakirnichnaya M. M. study of the dynamics of motion of the medium in the precipitation tubing stripper column using the program FLOWVISION *Mirovye soobschestvo: problemy i puti resheniya - The Global community: problems and solutions*. Ufa, 2007. p.259 [in Russian].

8 Tropkin S., Devyatov A., Vinkler A., Tlyasheva R., Zakirnichnaya M. Prediction of fatigue strength of impellers of a centrifugal pump units with solutions SIMULIA: ABAQUS, FE-SAFE and complex hydrodynamic analysis is STUDIED *SAPR i grafika- CAD and graphics*. 2014. no. 5 (211). pp. 60-64. [in Russian].

9 Zakirnichnaya M. M., Devyatov A. R. Prediction of durability of impellers of centrifugal pump units for pumping of heavy oil products. *Neftegazovoe delo- Oil and gas business*, 2011. no. 6. pp. 420-438. [in Russian]. Available at: http://ogbus.ru/authors/Zakirnichnaya/Zakirnichnaya_3.pdf [in Russian].

10 Zakirnichnaya M. M., Devyatov A. R. Impellers operation life evaluation of centrifugal pump units. *Neftegazovoe delo- Oil and gas business*, 2010. no. 2. p. 50. [in Russian] Available at: http://ogbus.ru/authors/Zakirnichnaya/Zakirnichnaya_2.pdf

11 Zakirnichnaya M. M., Gatin R. N. Determination of allowable loads on the nozzle based on the total stress-strain state of the column apparatus. *Vestnik SGTU - Bulletin of Saratov state technical University*, 2008, vol. 3, no. 2 (35). pp. 35-39. [in Russian].

12 Zakirnichnaya M. M., Suleymanov M. R. Study of the stress-strain state of the working part of centrifugal pump units *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Neft- i gaz*. News of higher educational institutions. The oil and gas, 2007, no. 5. pp. 84-88. [in Russian].

Закирничная М. М., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
М. М. Zakirnichnaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Technological Machines and Equipment» FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: zakmarina@mail.ru

Кульшарипов И. М., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО УГНТУ г. Уфа, Российская Федерация

I. M. Kulsharipov, Post-graduate Student of the Chair «Technological Machines and Equipment» FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: kim102@mail.ru