

УДК 620.169:621.646.1

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ С УЧЕТОМ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРИМЕРЕ КЛИНОВОЙ ЗАДВИЖКИ ЗКЛ2 300-25

© М. М. Закирничная, И. М. Кульшарипов, А. Ю. Чернова¹

Статья поступила 22 января 2016 г.

Исследовано влияние технологических параметров потока на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов клиновых задвижек на примере ЗКЛ2 300-25 с использованием программного комплекса (ПК) ABAQUS. Проведены численные расчеты на основе ПК с учетом температуры протекающей через задвижку жидкости, в качестве которой рассмотрены вода, мазут и бензин, в заданном диапазоне скоростей течения. Определены основные параметры, влияющие на срок службы конструктивных элементов запорной арматуры. С использованием модуля ПК ABAQUS/FE-SAFE разработан алгоритм комплексного подхода к оценке долговечности клиновых задвижек, который может быть рекомендован организациям, составляющим проектно-сметную документацию на ремонт, реконструкцию, расширение и техническое перевооружение опасных производственных объектов.

Ключевые слова: клиновая задвижка; напряженно-деформированное состояние; остаточный ресурс; ABAQUS; FE-SAFE.

Трубопроводные системы, применяемые в нефтегазовой отрасли, включают в себя большое количество конструктивных элементов, в том числе и запорную арматуру [1]. Согласно требованиям Ростехнадзора организации, разрабатывающие проектно-сметную документацию на ремонт, реконструкцию, расширение и техперевооружение опасных производственных объектов, должны указывать в ведомости трубопроводов срок службы арматуры с учетом реальных условий эксплуатации. В то же время завод-изготовитель трубопроводной арматуры отмечает в сопроводительной документации срок службы задвижки, определенный для рабочей среды — воды при температуре 20 °С.

В результате исследований [2, 3] 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, получены [2] зависимости максимальных эквивалентных напряжений от степени открытия проходного сечения клиновой задвижки ЗКЛ2 200-160 ХЛ1 для такой рабочей среды, как вакуумный газойль. Исходя из полученных данных, установлено, что максимальные эквивалентные напряжения возникают в области зацепов клина при степени открытия проходного сечения на 5 % [4]. Результаты расчета НДС конструктивных элементов задвижки ЗКЛ2 250-25 для рабочей среды — мазута подтвердили характер зави-

симости максимальных эквивалентных напряжений от степени открытия проходного сечения [3].

Однако несмотря на то, что к настоящему времени решена комплексная задача по оценке напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов клиновой задвижки с учетом гидродинамики потока жидкости на примере таких рабочих сред, как вакуумный газойль и мазут [5], влияние гидродинамических характеристик потока жидкости на значение долговечности клиновых задвижек не оценено.

Поэтому цель данной работы — оценка степени влияния НДС конструктивных элементов клиновой задвижки с учетом гидродинамики потока жидкости на долговечность. В качестве объекта исследований выбрана задвижка ЗКЛ2 300-25 (задвижка клиновая литая, условный диаметр 300 мм, условное давление 2,5 МПа), которая наряду с ЗКЛ2 250-25 наиболее часто используется в трубопроводных системах нефтеперерабатывающих заводов; количество отказов задвижек этого типоразмера велико (рис. 1).

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

построение объемной твердотельной модели (3D-модели) задвижки ЗКЛ2 300-25 в программном комплексе (ПК) SOLID WORKS;

расчет гидродинамики потока жидкости для разработанной модели с использованием ПК ABAQUS;

определение напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов задвижки ЗКЛ2 300-25 с учетом гидродинамики потока транспортируемой жидкости с использованием ПК ABAQUS;

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, ugnntu_proekt@mail.ru

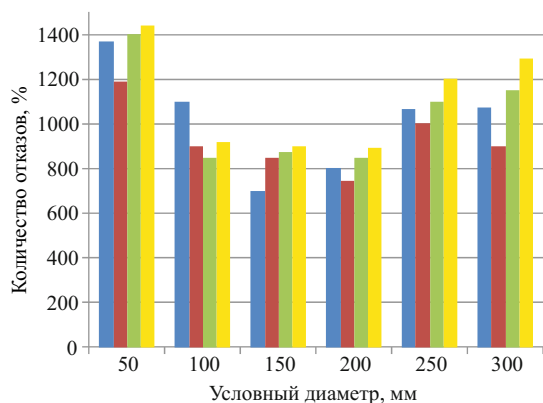


Рис. 1. Динамика отказов клиновых задвижек на примере одного из нефтеперерабатывающих заводов г. Уфы: ■ — 2011, ■ — 2012, ■ — 2013, ■ — 2014 гг.

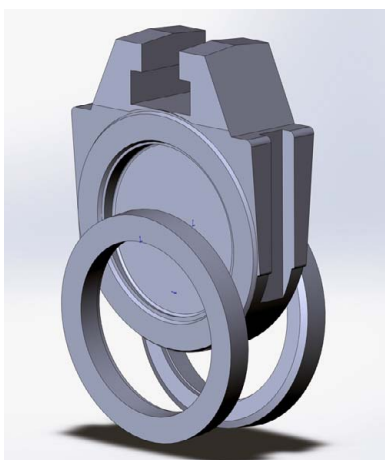


Рис. 2. 3D-модель сборки клина и уплотнительных колец клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25 (открытие клина на 50 %)

оценка долговечности для задвижки ЗКЛ2 300-25 с использованием модуля ПК ABAQUS/FE-SAFE с учетом цикла изменения максимальных эквивалентных напряжений при увеличении степени открытия проходного сечения от 0 до 100 %;

создание алгоритма комплексного подхода к оценке долговечности клиновых задвижек с учетом рабочих параметров эксплуатации.

3D-модели конструктивных элементов (клина и уплотнительного кольца) и проточной части задвижки разрабатывали по чертежам одного из заводов-изготовителей трубопроводной арматуры с использованием ПК SOLID WORKS. В качестве примера на рис. 2 представлена 3D-модель сборки клина и уплотнительных колец клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25, в которой клин расположен в полуоткрытом положении относительно посадочного места. На рис. 3 показана 3D-модель проточной части задвижки ЗКЛ2 300-25. Для изучения влияния эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние задвижки ЗКЛ2 300-25 технические характеристики принимали согласно каталогу этого же завода-изготовителя.



Рис. 3. 3D-модель проточной части клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25

Для моделирования течения потока жидкости через задвижку ЗКЛ2 300-25 и расчета НДС конструктивных элементов использовали программный конечно-элементный комплекс ABAQUS — универсальную систему общего назначения, предназначенную как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности [7].

В качестве транспортируемой среды для расчетов выбрали тяжелую фракцию нефти — мазут и легкую фракцию — бензин. Температуру среды принимали согласно температурному ограничению транспортировки мазута и бензина в нефтеперерабатывающей промышленности — от 50 до плюс 300 °С и от 28 до 180 °С соответственно. Для уточнения значения срока службы задвижки ЗКЛ2 300-25, назначаемого заводом-изготовителем, исследования проводили также для такой рабочей среды, как вода.

В рабочем пространстве ПК ABAQUS в базе данных построения модели выбирали гидродинамический расчет по типу CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS).

Подготовленную трехмерную модель проточной части задвижки в ПК SOLIDWORKS импортировали в формате PARASOLID (*.x_t) в ПК ABAQUS. В модуле PROPERTY задавали физические свойства транспортируемой среды (рис. 4).

В модуле LOAD, предназначенном для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий, задавали сосредоточенную силу, действующую на входное и выходное отверстия проточной части задвижки. В появившемся окне CREATE LOAD в графе STEP указывали шаг LOADING, на котором действует нагрузка.

Далее определяли категорию нагрузки (CATEGORY FLUID), тип нагружения (TYPES FOR SELECTED STEP), вход-выход жидкости (FLUID INLET/OUTLET), граничные условия на стенке для объема проточной части (FLUID WALL CONDITION).

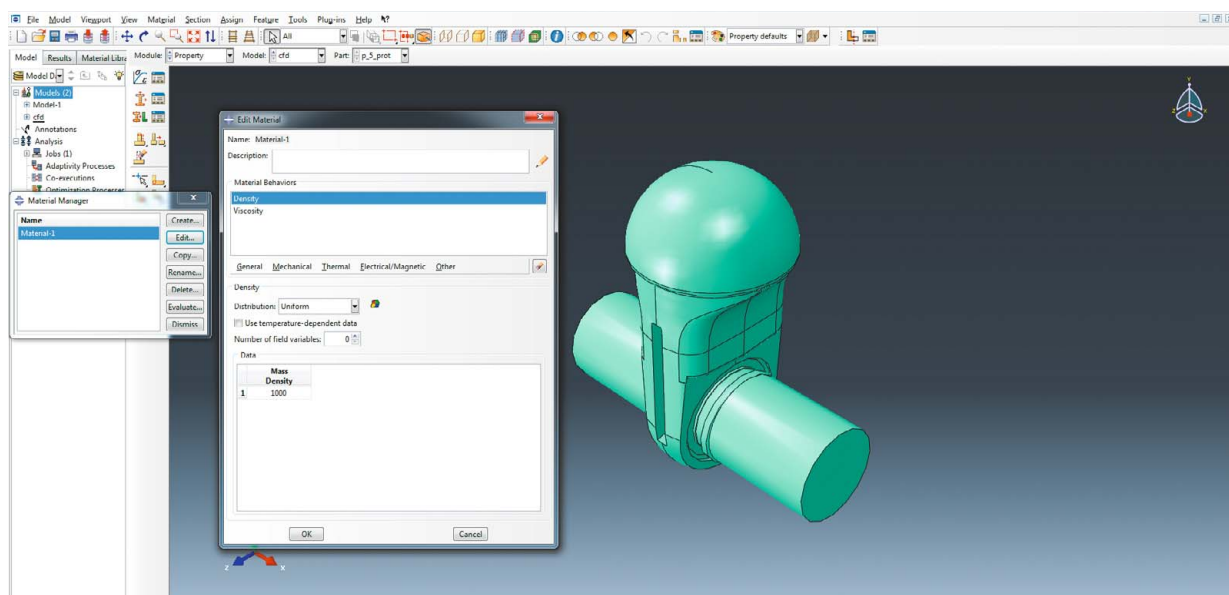


Рис. 4. Вывод окна модуля PROPERTY

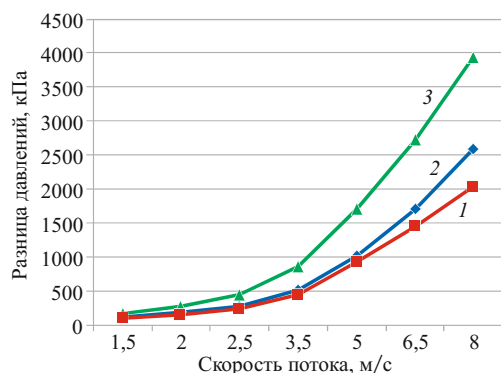


Рис. 5. Зависимость разницы давления в системе и максимального давления на клин от скорости потока при степени открытия проходного сечения на 5 % для задвижек типа ЗКЛ2 200-160 [2] (1), ЗКЛ2 250-25 [3] (2) и ЗКЛ2 300-25 (3); рабочая среда — вода

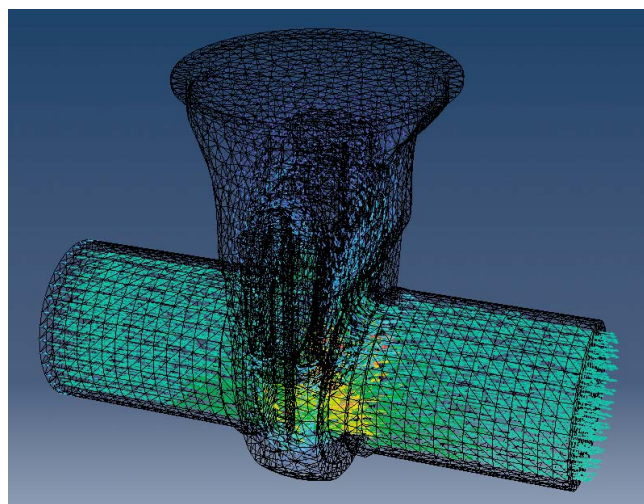


Рис. 6. Графическое представление векторного поля при скорости потока 2 м/с в проточной части задвижки ЗКЛ2 300-25

На входе задвижки задавали скорость потока транспортируемой среды, на выходе — давление, равное 0 Па.

Для изучения гидродинамики потока движения транспортируемой среды применяли относительную скорость, выраженную в векторной форме и характеризующую движение жидкости по отношению к стенкам задвижки. Исходя из реальных условий применения данной задвижки, выбран диапазон скорости течения жидкости — от 1,5 до 8 м/с.

В результате исследования гидродинамики потока жидкости клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25 с помощью программного модуля ABAQUS/CFD получены зависимости степени влияния потока транспортируемых сред (вода, мазут, бензин) на давление на клин, которые согласуются с результатами расчетов для задвижек ЗКЛ2 200-160 и ЗКЛ2 250-25 (рис. 5).

Пример графического представления векторного поля скоростей потока в плоскости симметрии за-

движки ЗКЛ2 300-25 при открытии проходного сечения на 5 % приведен на рис. 6.

Установлено, что максимальное значение разницы давления в системе и максимального давления на клин в процессе открытия-закрытия задвижки ЗКЛ2 300-25 возникает при степени открытия проходного сечения на 5 % (рис. 7). В этом случае при температуре 100 °С и скорости потока 1,5 м/с разница давления в системе и максимального давления на клин составляет: 287 кПа — для воды; 265 кПа — для бензина и 292 кПа — для мазута.

Таким образом, для расчета НДС конструктивных элементов задвижки ЗКЛ2 300-25 необходимо учитывать не только рабочее давление в системе, но и давление, возникающее из-за скорости движения потока транспортируемой среды.

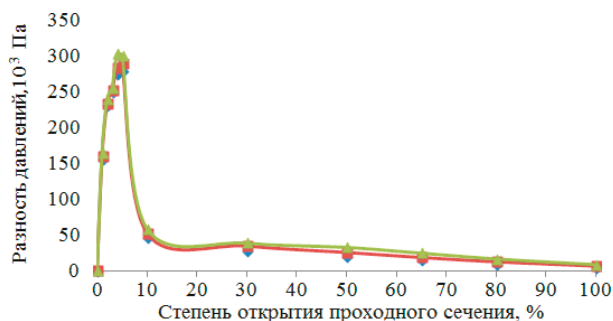


Рис. 7. Зависимость разности давления в системе и максимального давления на клин задвижки ЗКЛ2 300-25 для воды при скорости потока 1,5 м/с от степени открытия проходного сечения:
 ◆ — 20 °C; ■ — 50 °C; ▲ — 100 °C

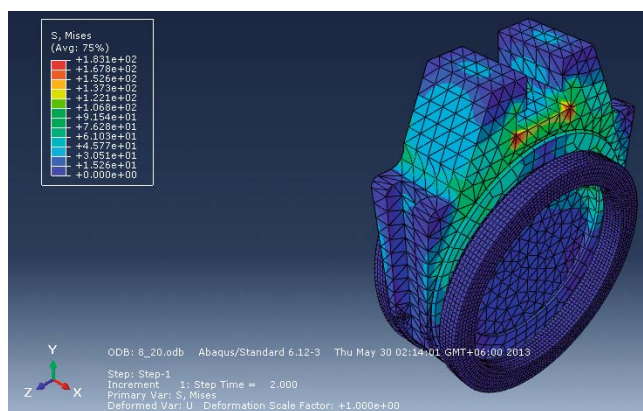


Рис. 9. Распределение напряжений по клину при давлении в системе 2,5 МПа и скорости потока 1,5 м/с

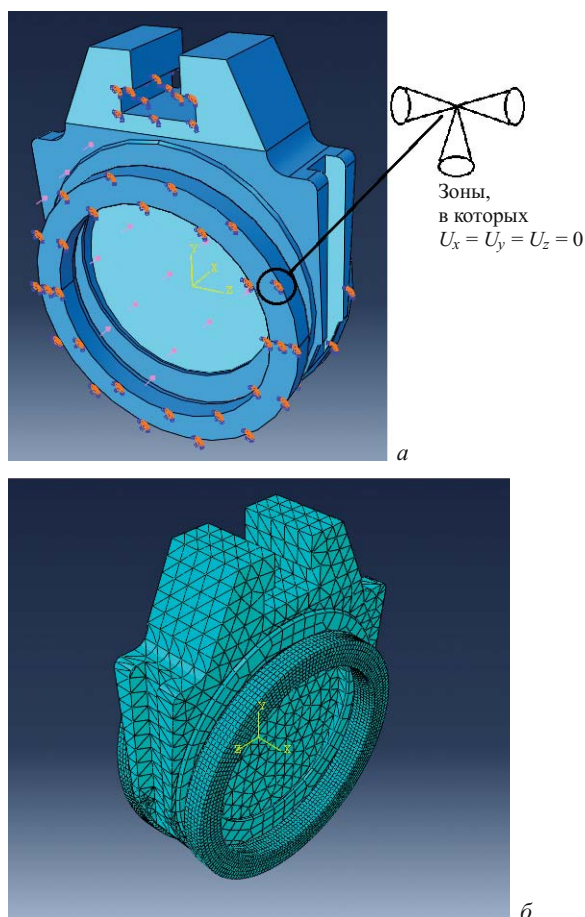


Рис. 8. Схема закреплений и приложения нагрузок на клин (а) и сетка конечных элементов клина и уплотнительных колец (б)

Далее оценивали НДС конструктивных элементов задвижки ЗКЛ2 300-25 с учетом гидродинамических характеристик потока транспортируемых жидкостей (воды, бензина и мазута). Воздействие потока на зацепы клина учитывали путем прибавления разницы давлений в системе и максимального давления на клин, полученной при исследованиях гидродинамики потока, к рабочему давлению в системе в виде равномерно распределенной нагрузки.

Физико-механические свойства материала задвижки — стали 20Л (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) при изменении рабочей температуры потока принимали согласно литературным данным и задавали в модуле PROPERTY.

Для 3D-модели конструктивных элементов в ПК ABAQUS были определены поверхности контакта и задана распределенная поперечная нагрузка — давление (модуль LOAD). Взаимодействие между деталями задавали на поверхностях контакта клина и уплотнительных колец (модуль INTERACTION). В модуле LOAD были также заданы граничные условия — условия закрепления (рис. 8, а). Кольца и клин закрепляли относительно плоскости симметрии ($U_z = U_x = U_y = 0$). К одной из сторон клина по оси OX была приложена распределенная нагрузка, соответствующая максимальному давлению на клин при данном варианте расчета.

На рис. 8, б показана сетка конечных элементов клина и уплотнительных колец. Определен минимальный размер элемента и выбран тип объемного элемента: для уплотнительных колец — кубический (шаг аппроксимации 35); для клина — тетраэдрический (шаг аппроксимации 27), поскольку клин имеет сложную конфигурацию.

Расчеты НДС клина задвижки ЗКЛ2 300-25 показали (рис. 9), что значительных деформаций клина, требуемых для отклонения его от вертикали и смещения в области посадочного места, не возникает. Однако существуют определенные сочетания рабочих параметров, при которых эквивалентные напряжения в зацепах клина превышают допустимые значения. При этом на эквивалентные напряжения в значительной степени влияет скорость потока транспортируемых жидкостей (рис. 10).

Исходя из полученных данных, рекомендована область условий эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 на примере рабочей среды — бензина (табл. 1). Аналогичные диапазоны рабочих условий эксплуатации задвижки получены для других рабочих сред (воды и

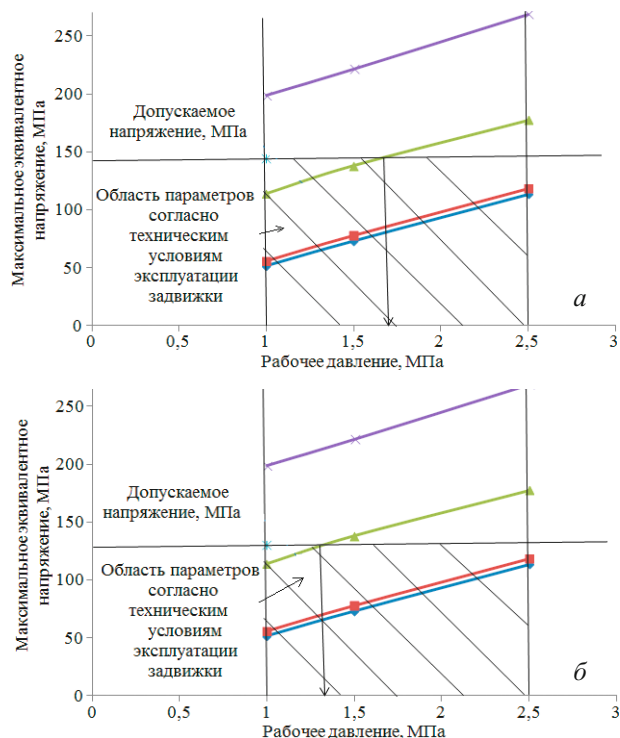


Рис. 10. Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на зацепах клина от давления в системе при открытии проходного сечения на 5 % (рабочая среда — вода) при температурах 20 (а) и 100 °С (б) и скоростях потока v (м/с), равных 1,5 (◆); 2,5 (■); 5,0 (▲); 8,0 (×)

мазута) на основании расчетов НДС клиновых задвижек с учетом гидродинамики потока жидкости.

Для оценки долговечности задвижки ЗКЛ2 300-25 использовали программный модуль ABAQUS/FE-SAFE.

Последовательность расчета в FE-SAFE следующая: полученные в ПК ABAQUS данные интегрируются в модуль FE-SAFE; выбираются параметры расчета модуля, а также их размерности; выбирается материал; задается алгоритм вычисления; проводится расчет.

Как показали результаты исследования НДС конструктивных элементов, при изменении температуры рабочей среды происходят незначительные изменения значений максимальных эквивалентных напряжений на зацепах клина. Поэтому для расчетов принимали температуру среды, равную 100 °С. Скорость потока транспортируемой среды изменялась от 1,5 до 5 м/с.

Анализ технической литературы и каталогов заводов, специализирующихся на разработке и изготовле-

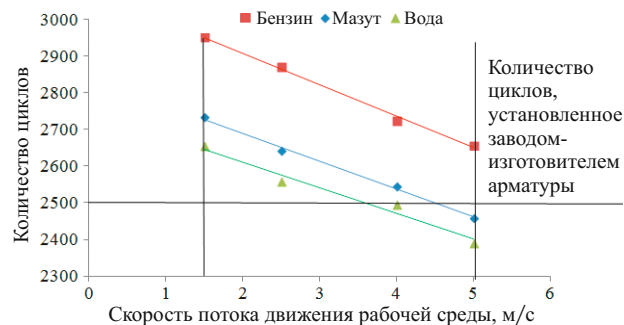


Рис. 11. Зависимость количества циклов работы задвижки ЗКЛ2 300-25 от скорости потока жидкости

Таблица 2. Результаты расчета назначаемого срока службы (циклы) задвижки ЗКЛ2 300-25 в ПК FE-SAFE

Скорость потока жидкости, м/с	Рабочая среда		
	Мазут	Бензин	Вода
1,5	2734	2952	2654
2,5	2642	2871	2557
4,0	2545	2725	2495
5,0	2460	2657	2389

нии запорной арматуры, показал, что срок безопасной эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 устанавливается в диапазоне от 2500 до 3000 циклов. Однако в результате проведенных исследований (рис. 11) установлено, что технологические параметры потока влияют на изменение долговечности задвижки ЗКЛ2 300-25.

Полученные результаты расчета назначаемого срока службы задвижки ЗКЛ2 300-25 в модуле ABAQUS/FE-SAFE с учетом изменения скорости потока перекачиваемых рабочих сред представлены в табл. 2.

Таким образом, на значения долговечности влияют: температура, рабочее давление, скорость потока и физические свойства транспортируемой жидкости. Поэтому организации, разрабатывающие проектно-сметную документацию на ремонт, реконструкцию, расширение и техперевооружение опасных производственных объектов в ведомости трубопроводов должны указывать срок службы задвижки с учетом гидродинамических характеристик потока и оценки напряженно-деформированного состояния запорной арматуры.

Исходя из результатов исследований, предложен алгоритм комплексного подхода к оценке долговечно-

Таблица 1. Диапазон рабочих условий эксплуатации задвижки (рабочая среда — бензин)

Температура, °С	Максимальное разрешенное рабочее давление (МПа) при скоростях потока (м/с)									
	1,5	2,5	3	4	5	5,5	6	7	8	
28	Согласно техническим условиям эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 (2,5 МПа)				2,2	1,75	1,25			
50	Согласно техническим условиям эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 (2,5 МПа)				2,45	2,1	1,65	Превышение значений рабочих давлений, установленных техническими условиями эксплуатации задвижки		
100	Согласно техническим условиям эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 (2,5 МПа)				2,25	1,7	1,35	Превышение значений рабочих давлений, установленных техническими условиями эксплуатации задвижки		
180	Согласно техническим условиям эксплуатации задвижки ЗКЛ2 300-25 (2,5 МПа)				1,8	1,5	1,1	Превышение значений рабочих давлений, установленных техническими условиями эксплуатации задвижки		

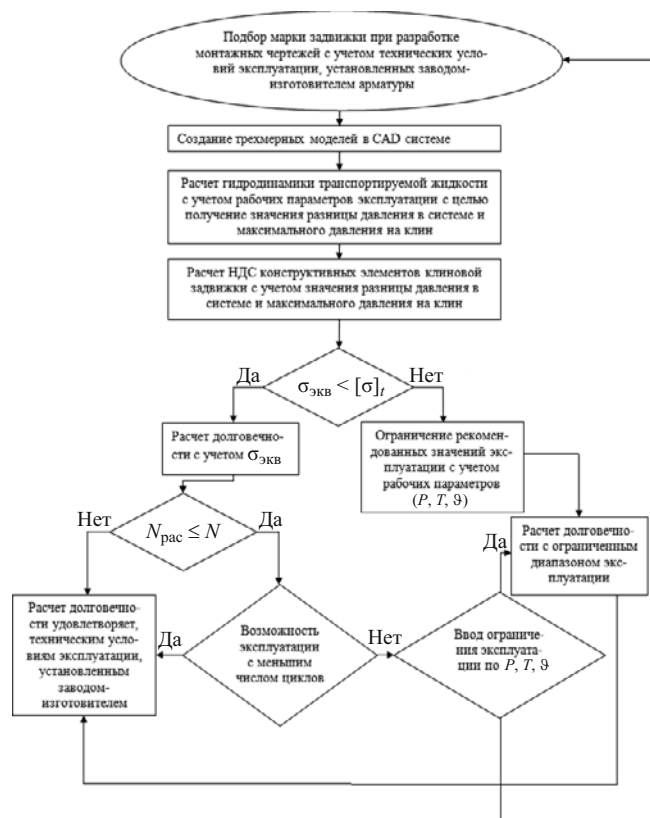


Рис. 12. Алгоритм комплексного подхода к оценке долговечности клиновых задвижек с учетом рабочих параметров эксплуатации

сти клиновых задвижек с учетом рабочих условий эксплуатации (рис. 12). Данный алгоритм включает последовательное применение ПК SOLID WORKS для построения конструктивных элементов задвижки, ПК ABAQUS — для моделирования течения рабочей жидкости через проточную часть задвижки и оценки НДС, программного модуля ABAQUS/FE-SAFE — для расчета долговечности с учетом циклических нагрузок в процессе открытия и закрытия задвижки.

Ключевым моментом в оценке долговечности (N) клиновых задвижек является сравнение максимальных эквивалентных напряжений ($\sigma_{\text{экв}}$), полученных после расчета НДС с учетом гидродинамики потока транспортируемой среды, с допускаемыми напряжениями ($[\sigma]_t$) металла при рабочей температуре.

Разработанный алгоритм комплексного подхода к оценке долговечности клиновых задвижек может быть рекомендован организациям, разрабатывающим проектно-сметную документацию на ремонт, реконструкцию, расширение и техперевооружение опасных производственных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметов С. А., Сериков Т. П., Кузеев И. Р., Баязитов М. И. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа. — СПб.: Недра, 2006. — 868 с.

2. Закирничная М. М., Иванова Е. И. Влияние местного сопротивления в виде запорной арматуры на изменение гидродинамики потока жидкости в трубопроводе / Нефтегазовое дело. Научно-технический журнал. 2006. Т. 4. № 2. С. 64 – 70.
3. Закирничная М. М., Кульшарипов И. М. Особенности моделирования гидродинамических процессов в проточной части клиновых задвижек / Химическая техника. 2012. № 4. С. 16 – 18.
4. Закирничная М. М., Иванова Е. И. Особенности построения трехмерной твердотельной модели задвижки ЗКЛ2 200-160 для определения напряженно-деформированного состояния ее проточной части / Компьютерный и инженерный анализ: сб. материалов IV Российской научно-технической конференции. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 32 – 33.
5. Закирничная М. М., Кульшарипов И. М. Применение современных программных комплексов при моделировании гидродинамических процессов в проточной части клиновых задвижек / Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах. Технический надзор, диагностика и экспертиза: сб. материалов VI научно-практической конференции. — Уфа, 2012. С. 110 – 115.
6. Закирничная М. М., Кульшарипов И. М. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов клиновой задвижки ЗКЛ2 250-25 / Остаточный ресурс нефтезаводского оборудования / Материалы Международной научно-технической конференции. — Уфа, 2014. С. 10 – 12.
7. Золочевский А. А., Беккер А. А. Введение в ABAQUS. Методическое пособие. — Харьков, 2011. — 49 с.
8. Соболева Е. В., Гусева А. Н. Химия горючих ископаемых: Учебник. — М.: МГУ, 2010. — 312 с.

REFERENCES

1. Akhmetov S. A., Serikov T. P., Kuzeev I. R., Bayazitov M. I. Tekhnologiya i oborudovanie protsessov pererabotki nefi i gaza [Oil and gas refining processes technology and equipment]. — St. Petersburg: Nedra, 2006. — 868 p. [in Russian].
2. Zakirnichnaya M. M., Ivanova E. I. Vliyaniye mestnogo soprotivleniya v vide zapornoj armatury na izmeneniye gidrodinamiki potoka zhidkosti v truboprovode [Local resistance in terms of shut-off valves influence on pipeline fluid flow hydrodynamic changes] / Neftgaz. Delo. Nauch.-Tekhn. Zh. 2006. Vol. 4. N 2. P. 64 – 70 [in Russian].
3. Zakirnichnaya M. M., Kul'sharipov I. M. Osobennosti modelirovaniya gidrodinamicheskikh protsessov v protochnoi chasti klinovykh zadvizhek [Wedge gate valves flow part hydrodynamic processes simulation particularities] / Khim. Tekhnika. 2012. N 4. P. 16 – 18 [in Russian].
4. Zakirnichnaya M. M., Ivanova E. I. Osobennosti postroeniya trekhmernoi tverdotel'noi modeli zadvizhki ZKL2 200-160 dlya opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ee protochnoi chasti [ZKL2 200-160 wedge gate valve 3D-model building particularities for its flow part stress-strain state determining] / Computer and Engineering Analysis: Proc. of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference. — Yekaterinburg: Izd. UGTU-UPI, 2007. P. 32 – 33 [in Russian].
5. Zakirnichnaya M. M., Kul'sharipov I. M. Primeneniye sovremennykh programnykh kompleksov pri modelirovaniy gidrodinamicheskikh protsessov v protochnoi chasti klinovykh zadvizhek [Modern software packages using for wedge gate valves flow part hydrodynamic processes simulation] / Industrial safety in explosive and chemically hazardous production facilities. Technical supervision, diagnostics and expertise: a collection of materials VI scientific-practical conference. — Ufa, 2012. P. 110 – 115 [in Russian].
6. Zakirnichnaya M. M., Kul'sharipov I. M. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktivnykh elementov klinovoi zadvizhki ZKL2 250-25 [ZKL2 250-25 wedge gate valve constructive elements stress-strain state assessment] / Remaining Life refinery equipment: Proc. of the International Scientific and Technical Conference. — Ufa, 2014. P. 10 – 12 [in Russian].
7. Zolochevskii A. A., Bekker A. A. Vvedeniye v ABAQUS. Metodicheskoye posobie [Introduction to ABAQUS. Toolkit]. — Khar'kov, 2011. — 49 p. [in Russian].
8. Soboleva E. V., Guseva A. N. Khimiya goryuchikh iskopaemykh: Uchebnik [Cautobioliths chemistry: textbook]. — Moscow: Izd. MGU, 2010. — 312 p. [in Russian].