

## Определение коэффициента местных потерь соединительных элементов авиационных гидравлических систем на основе виртуального эксперимента

*Изучена возможность применения виртуальных экспериментов в программных комплексах FloEFD for Siemens NX и Femap для определения коэффициентов местных потерь в соединительных элементах авиационных гидравлических систем. Для верификации методики проведены эксперименты на типовых соединительных элементах. По разработанной методике были изучены местные сопротивления гидравлического соединителя типа «тройник» при его работе на различных режимах. По результатам экспериментов получены картины распределения потоков внутри исследуемых соединителей, значения коэффициентов местных потерь, и сделаны выводы о возможности применения виртуальных экспериментов для решения подобных задач. Описан виртуальный эксперимент по определению температурных деформаций в гидравлических соединителях, и сделан вывод об отсутствии необходимости учитывать температурные деформации для расчета коэффициентов местных потерь.*

**И.О. БОБАРИКА,**  
канд. техн. наук,

**А.С. ГРУЗДЕВ,**  
аспирант,

**И.О. ПАДУРАРЬ,**  
студент

(Иркутский национальный  
исследовательский  
технический университет,  
Иркутск)  
gruzdev-as@yandex.ru

**Потери напора, местные сопротивления, гидравлические системы, виртуальный эксперимент**

Особенности авиационных гидравлических систем – жесткие требования, предъявляемые к системам (герметичность класса «А» и т. д.), высокое рабочее давление, необходимость размещать трубопроводы близко друг к другу с минимальными зазорами ввиду ограниченности доступных пространств, сложная пространственная трассировка и, как следствие, необходимость применения нестандартных трубопроводных соединителей. В связи с этим необходимо определять параметры системы на этапе ее эскизного проектирования, т. е. когда известны только принципиальная схема в базовом варианте и основная функция системы [1].

В современных работах изучаются и анализируются гидравлические системы летательных аппаратов [2–4]. В работе [5] уже рассматривалась методика выбора оптимальных параметров трубопроводных авиационных систем, однако в дальнейшем было установлено, что отсутствие учета местных сопротивлений (в работе использовался метод вычисления падений давления по эквивалентной длине [6, 7] участка трубопровода) может существенно влиять на выбор оптимальных параметров.

Как было указано, из-за особенностей авиационных гидравлических систем в случае применения гидравлических соединителей сложной пространственной конфигурации, а также из-за того, что математический аппарат определения коэффициентов местных потерь не представлен единой универсальной формулой, процесс определения местных потерь зависит от накопленного опыта. Для решения данного противоречия предлагается изучить возможность использования виртуальных экспериментов для определения гидравлических коэффициентов гидравлических соединителей с целью создания и наполнения инженерной базы знаний, которая может быть использована для более сложных инженерных расчетов, например для оптимизации.

Местными потерями напора называют затраты удельной механической энергии, обусловленные работой сил трения и вихреобразованием, в результате преодоления потоком жидкости местного сопротивления [8]. Потери условно подразделяют на две группы: 1) потери напора по длине  $h_\lambda$  (линейные) – потери, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения; 2) местные потери напора  $h_\xi$ .

Полные потери напора  $H$  на данном участке складываются из линейных и местных потерь:

$$H = h_\lambda + h_\xi .$$

Потери напора по длине как при ламинарном, так и при турбулентном течении в трубопроводах круглого сечения определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_\lambda = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления по длине (коэффициент Дарси);  $l$  – длина участка;  $d$  – диаметр трубопровода;  $v$  – средняя скорость течения;  $g$  – ускорение свободного падения. Возникновение местных гидравлических потерь обусловлено фасонными частями трубопроводов, прочими элементами трубопроводных систем, а также изменением диаметра трубопровода, крутоизогнутыми участками трубопроводов (или патрубками) в местах плотного монтажа и сложными пространственными развязками трубопроводных систем. Вследствие местных потерь происходит изменение скорости по величине и направлению в отдельных участках трубопровода. Местные потери зависят от геометрии элемента. Потери напора на местных сопротивлениях выражаются по формуле Вейсбаха:

$$h_\xi = \xi \frac{v^2}{2g},$$

где  $\xi$  – коэффициент местных сопротивлений.

Коэффициент сопротивления  $\lambda$  по длине зависит от двух параметров – числа Рейнольдса  $Re = \frac{ud}{\nu}$  и относительной шероховатости  $k_s/d$  (для круглых труб), где  $k_s$  – значение эквивалентной равнозернистой абсолютной шероховатости [5].

Коэффициент сопротивления определяется следующим образом:

$$\lambda = f\left(\text{Re}; \frac{k_s}{d}\right).$$

Потери напора, возникающие при преодолении какого-либо местного сопротивления, принято оценивать в долях скоростного напора, соответствующего скорости непосредственно за рассматриваемым сопротивлением [9]. В местном сопротивлении потери механической энергии при движении потока превращаются в тепловую энергию.

В профильной литературе [8] для типовых гидравлических соединителей приведены справочные значения коэффициента местных потерь, однако справочные значения для нетиповых элементов отсутствуют. Кроме этого, для ряда элементов (тройников и разветвителей) не приводятся зависимости коэффициента местных потерь от соотношения значений расхода потока жидкости на проток и ответвление [10], пространственной конфигурации тройников и разветвителей и других факторов. Математический аппарат определения коэффициентов местных потерь не представлен единой универсальной формулой, поэтому их, как правило, находят опытным путем [11–14]. Для основных видов местных потерь выведены свои зависимости коэффициента  $\xi$  от геометрии элемента, например для резкого сужения и резкого расширения. В основном коэффициент  $\xi$  является справочной величиной [8].

Виртуальные эксперименты по определению коэффициентов местных сопротивлений проводились в программном комплексе FloEFD for Siemens NX. Выбор программного продукта обусловлен простотой использования, широким функционалом по части интеграции и задания характеристик течения, наличием встроенного функционала по изучению сеточной независимости и возможностью гибкого распараллеливания большого количества опытов. Однако сама методика виртуальных экспериментов инвариантна к используемому программному продукту.

Для верификации методики были проведены виртуальные эксперименты для элементов с известным коэффициентом местного сопротивления. В связи с этим выбраны модели угольников с углами между патрубками в 90 и 45°. Приведем параметры расчетной модели, общие для всех расчетных случаев:

рабочая жидкость АМГ-10; турбулентное течение;  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности; пристенная функция – гладкая адиабатическая стенка.

Приведем параметры расчетной модели в случае угольников 90 и 45°. Граничное условие на входе – скорость на входе (3 м/с), граничное условие на выходе – статическое давление (101325 Па).

На рис. 1, *а* изображена геометрическая расчетная схема для угольника 90°, на рис. 1, *б* – для угольника 45°.

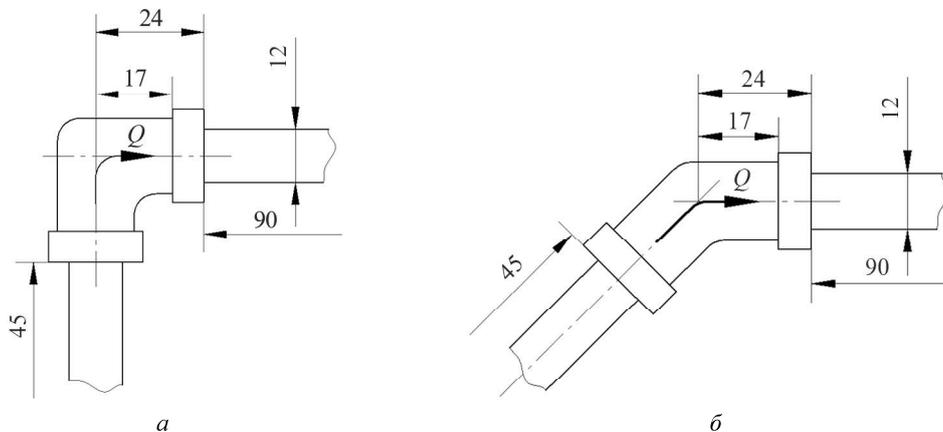


Рис. 1

В настоящей статье местные сопротивления изучались в узком диапазоне скоростей, что обуславливается допустимыми диапазонами скоростей гидравлической жидкости в напорных и всасывающих линиях гидросистем летательных аппаратов [15]. Рекомендуемая скорость течения в гидросистемах летательных аппаратов находится в диапазоне 0,5... 4 м/с для линий всасывания и в пределах 2,5...6 м/с для линий нагнетания.

Конечно-объемная сетка в продольном и поперечном сечениях для угольника 90° изображена на рис. 2, 3, *а*, для угольника 45° – на рис. 2, 3, *б*.

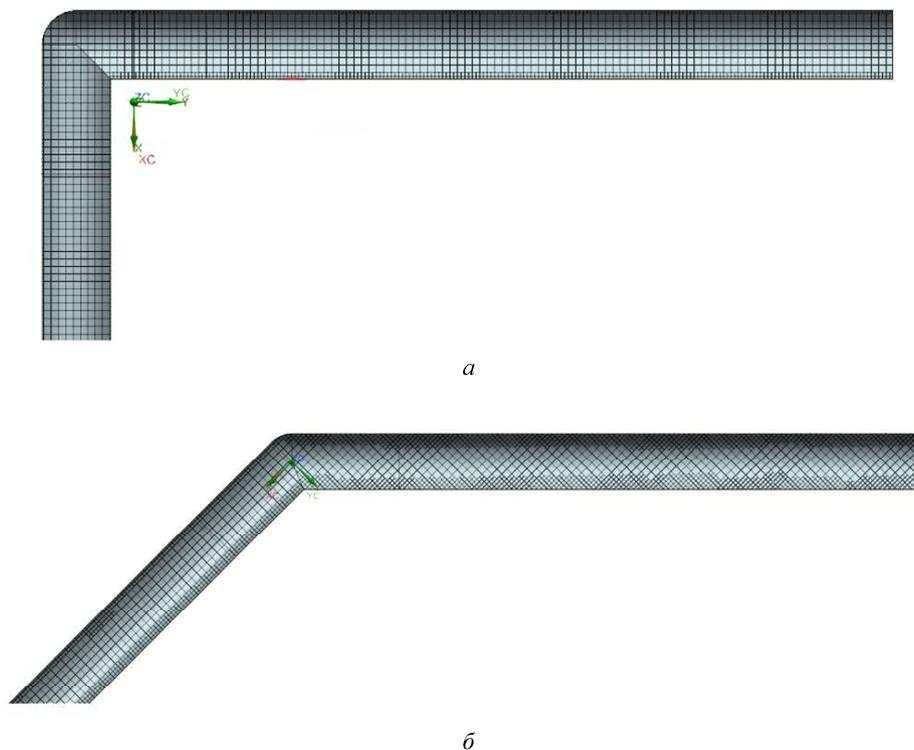


Рис. 2

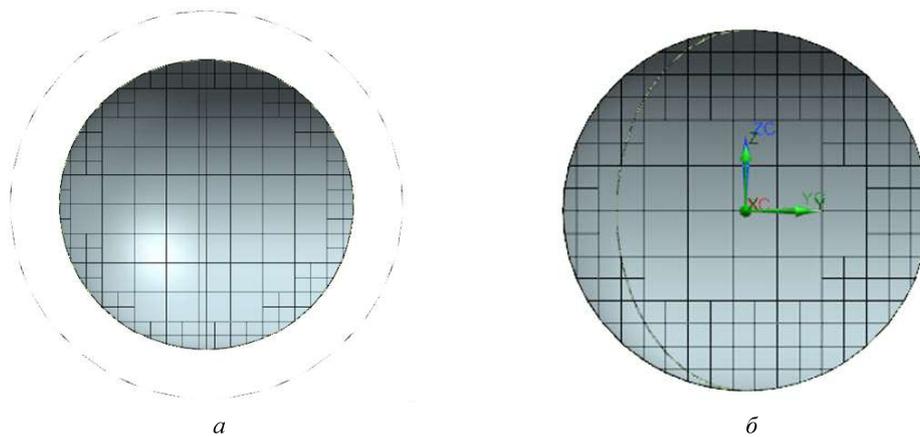


Рис. 3

Параметры конечно-объемной сетки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Угольник 90°	Угольник 45°
Количество ячеек в текучей среде, шт.	47749	53897
Количество ячеек на границе твердого тела и текучей среды, шт.	25534	21392

Для уточнения сетки и исследования вопросов сеточной независимости применялся функционал периодической адаптации расчетной сетки. Периодическая адаптация позволяет в процессе расчета изменять параметры базовой расчетной сетки с учетом промежуточных расчетных данных, тем самым повышаются точность и сходимости расчета. Полученная расчетная сетка в продольном и поперечном сечении также сравнивалась с расчетными сетками в существующих работах по исследованию характера течения в угольковых и Т-образных соединителях [16–18]. Таким образом, сделан вывод о корректности построения расчетной сетки.

Расчет в программном комплексе состоял из 354 итераций. Результаты расчета и критерии сходимости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Угольник 90°	Угольник 45°
Давление на выходе, Па	100415,95	105347,5
Разность давлений на входе и выходе, Па	11062,32	5173,81
Потери напора, Па	13043,05	8826,125
Коэффициент местных потерь	1,08	0,334
Величина критерия сходимости потерь напора, Па	294,2	294,2

Картинки распределения скорости потока в случае угольника 90° изображены на рис. 4, а, угольника 45° – на рис. 4, б.

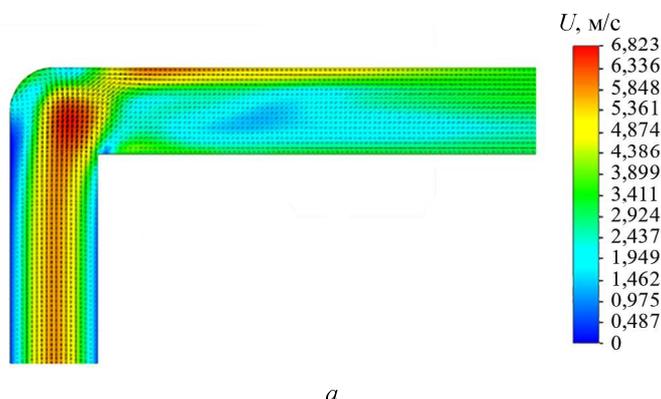
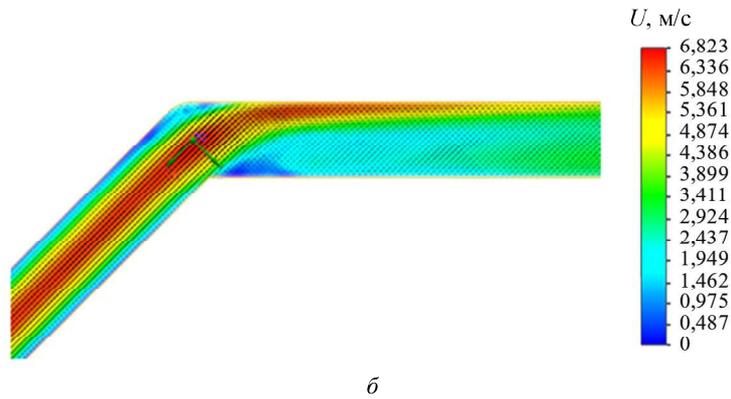


Рис. 4 (Начало)



б  
Рис. 4 (Окончание)

Относительные ошибки верификационного расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вид соединителя	Справочные значения коэффициента местных потерь	Расчетные значения коэффициента местных потерь	Относительная ошибка, %
Угольник 90°	1,2–1,1	примерно 1,08	примерно 1,85
Угольник 45°	0,35	примерно 0,334	примерно 4,79

Значение коэффициента местных потерь определялось из уравнения [9]:

$$H = \frac{8Q^2}{g\pi^2 d^4} \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta + 1 \right),$$

где  $Q$  – расход жидкости через соединитель;  $\zeta$  – коэффициент местных потерь.

По результатам верификационного эксперимента, отклонение полученных данных от данных [5] составляет не более 5 %, что позволяет сделать вывод о возможности использования выбранного метода для дальнейшего исследования.

В настоящей работе исследуется зависимость коэффициента местных потерь от процентного соотношения значений расхода в местах разветвления гидросистемы. В профильной литературе [8] данный вопрос изучался исключительно при работе разветвителя в режимах полного пропуск потока в одном из направлений. С помощью виртуального эксперимента возможно задать любое соотношение значений расхода и любые направления пропуск потока и определить в заданных условиях коэффициент местных гидравлических потерь. В настоящей работе описаны результаты двух виртуальных экспериментов.

В качестве расчетной модели в обоих экспериментах использовалась модель тройника TN100-12L. Общий вид и размеры модели представлены на рис. 5. Здесь:  $Q$  – расход на входе в тройник;  $Q_o$  – расход в отводящей ветви;  $Q_{пр}$  – расход в проточной ветви.

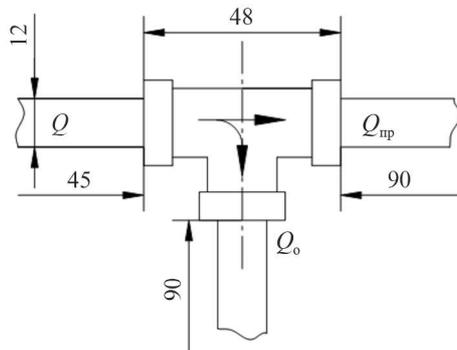


Рис. 5

В ходе первого виртуального эксперимента были заданы следующие процентные соотношения значений расхода в патрубках  $Q_0/Q_{пр}$  : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 96, 97, 98, 99, 100 %. Приведем другие параметры расчетной модели. Граничное условие на входе: статическое давление – 101325 Па. Граничные условия на выходе: расход на выходе на проток – 0–11,45 л/мин, на выходе на ответвление – 11,45–0 л/мин.

Приведем параметры конечно-объемной сетки: количество ячеек в текучей среде – 911124 шт., на границе твердого тела и текучей среды – 337049 шт.

В результате проведения виртуального эксперимента получены картины распределения скоростей в сечении тройника для соотношения 0 % (рис. 6, а), соотношения 30 % (рис. 6, б), соотношения 100 % (рис. 6, в).

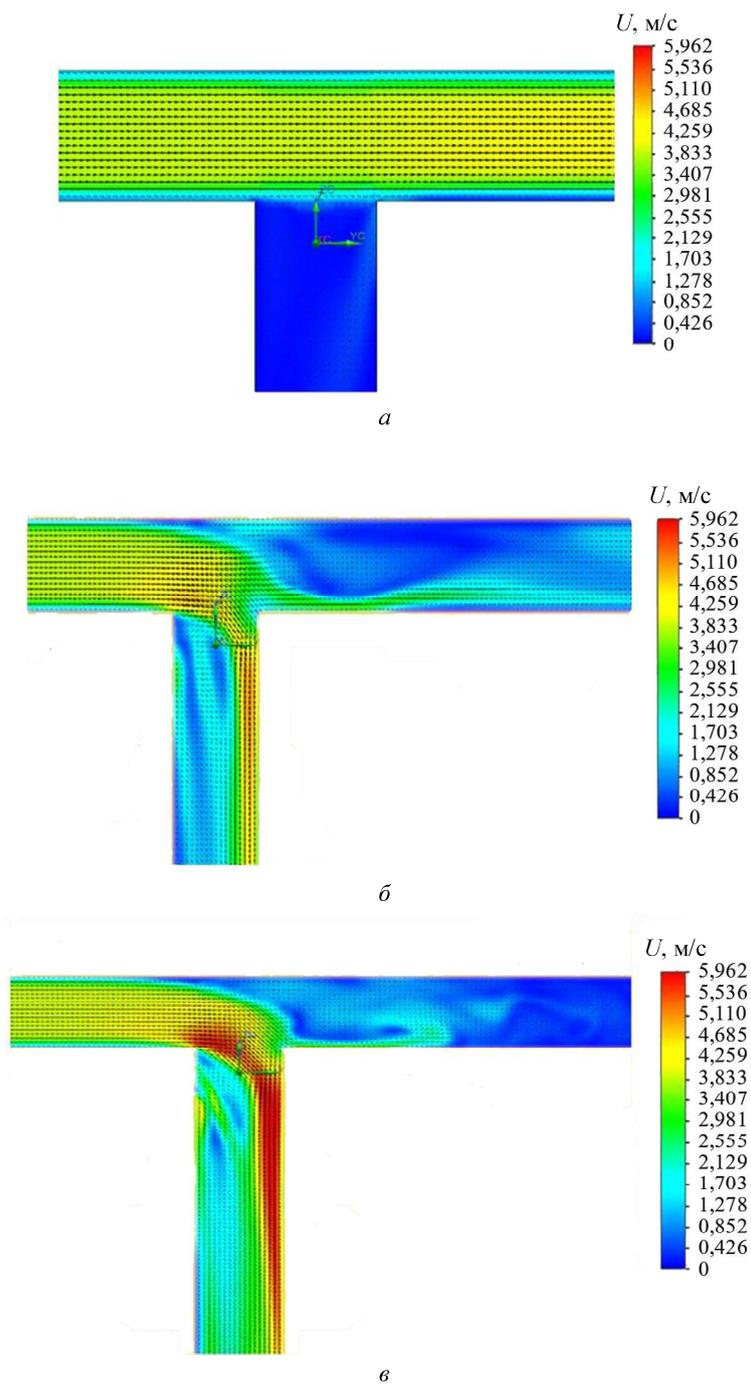


Рис. 6

Полученные картины согласуются с аналогичными, полученными в других работах, где исследуется характер потокораспределения в Т-образных соединителях [19–25]. Таким образом, можно сделать вывод о корректности проведенного расчета.

Каждый расчет составлял 247 итераций. Значение критерия сходимости для каждого расчета – 294,2 Па.

Продемонстрируем зависимость коэффициента местных потерь от процентного соотношения значений расхода (рис. 7, кривая 1) и полигональную аппроксимацию справочных значений на краевых точках (рис. 7, кривая 2) [8, 10].

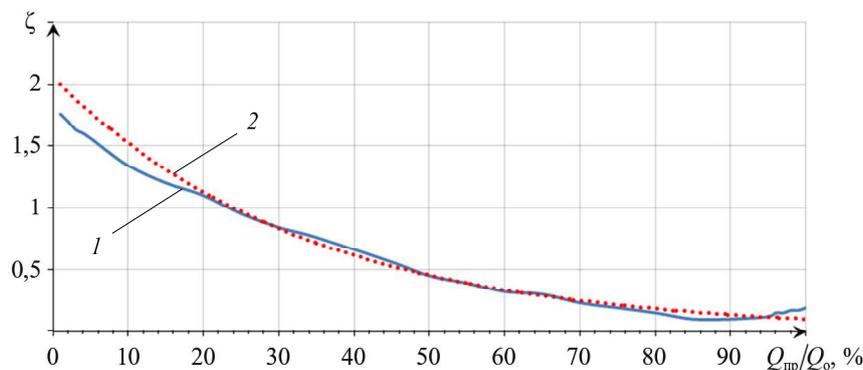


Рис. 7

В ходе второго эксперимента определялись потери напора при работе тройника по схеме, приведенной на рис. 8. Здесь:  $Q_л$ ,  $Q_п$  – расход в левом и правом патрубках. Для второго эксперимента были заданы те же соотношения значений расхода и рабочая жидкость, что и для первого эксперимента.

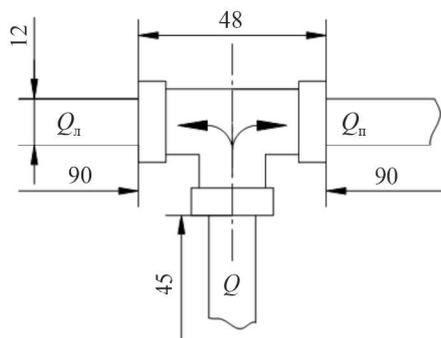


Рис. 8

График зависимости потерь напора от процентного соотношения значений расхода представлен на рис. 9.

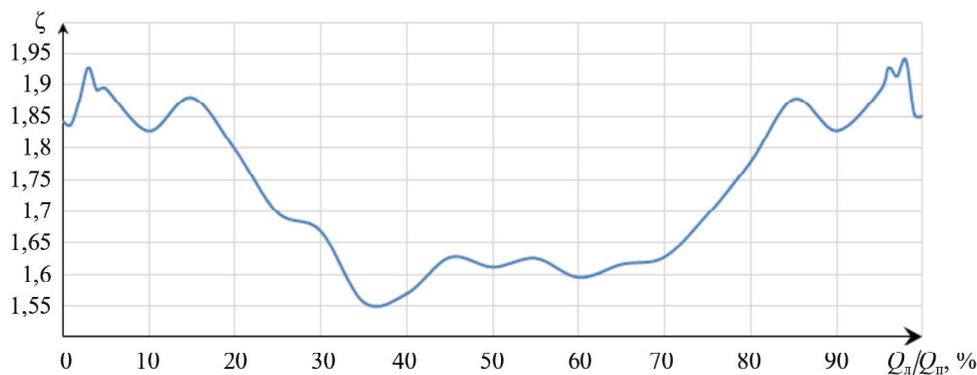


Рис. 9

Симметричность графика, а именно скачок коэффициента местных сопротивлений, обусловлен наличием вихря.

Распределение скоростей в сечении тройника TN100-12L представлено на рис. 10: *a* – соотношение расходов  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{л}}$  15 %; *б* – соотношение  $Q_{\text{п}}/Q_{\text{л}}$  85 %.

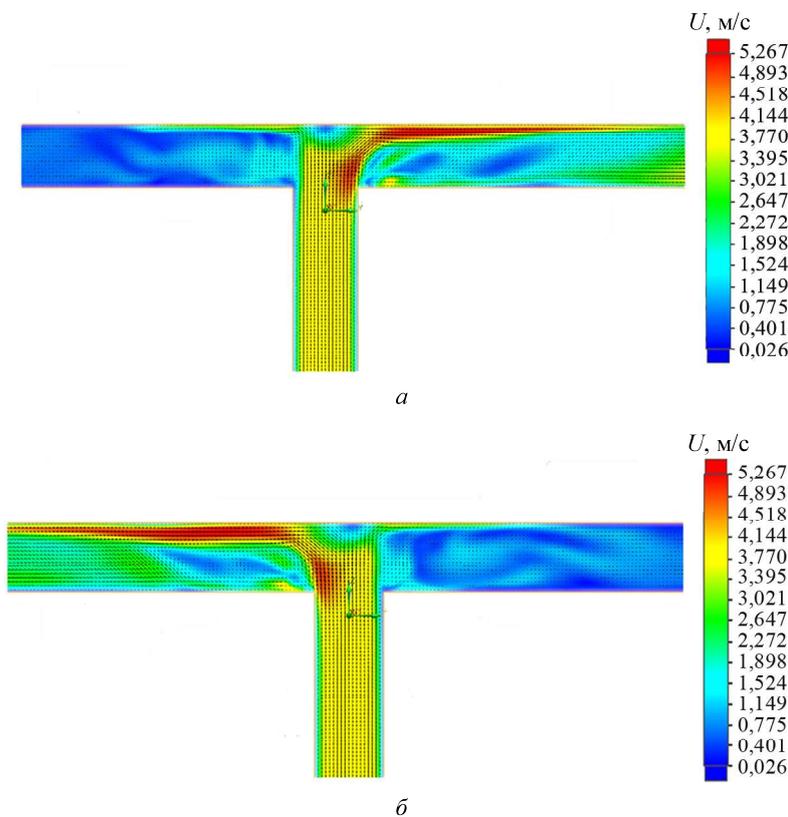


Рис. 10

Благодаря проведению виртуальных экспериментов возможно экономить время проверки некоторых гипотез, например изучение вопроса влияния на местные сопротивления температурных расширений соединительных элементов. Так, в источниках [26, 27] упоминается, что местные сопротивления могут также возникать ввиду температурных деформаций, возникающих в результате разницы температур рабочей жидкости и окружающей среды, а также локального изменения вязкости рабочей жидкости [28, 29].

С целью определения масштаба деформаций, возникающих в угловом соединителе при воздействии тепловой нагрузки, был проведен нелинейный анализ в программном комплексе Femap. Геометрия расчетной модели схематично изображена на рис. 1, *a*.

В качестве условий закрепления для расчетной модели была выбрана полная заделка боковых граней патрубков. Температурная нагрузка была задана внутри патрубков и угольника в виде распределенной температуры 40 °С. Температура окружающей среды из рекомендаций задана –40 °С.

Результат расчета представлен на рис. 11.

В ходе проведения расчета было установлено, что абсолютные температурные деформации в элементах трубопроводной арматуры не превышают 0,05 мм, что позволяет пренебрегать этими изменениями при расчетах коэффициентов местных сопротивлений. Изменение вязкости рабочей жидкости при этом, как было указано, учитывать необходимо, однако такое усложнение расчетных моделей не являлось целью настоящего исследования.

Таким образом, по результатам выполненного исследования можно сделать вывод о возможности использования методики виртуальных экспериментов для определения коэффициентов местных гидравлических сопротивлений нестандартных элементов гидравлических соединителей. Преимущества предлагаемого метода – возможность проводить любое количество экспериментов в короткие сроки с использовани-

ем программного обеспечения по распараллеливанию расчетов, а также возможность получения дополнительной информации о характере протекающих процессов. Недостатки использования виртуальных экспериментов – сильная зависимость результатов эксперимента от качества расчетной модели (достоверность геометрии, оптимальность расчетной сетки и т. д., а также длительное время подготовки моделей к расчету.

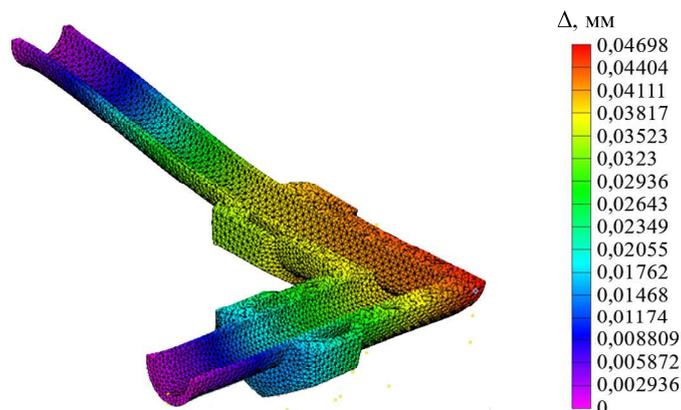


Рис. 11

Результаты проведенного исследования могут использоваться для оптимизации конструкции гидравлических авиационных систем на этапе схемного проектирования, позволяя использовать информацию о характере и величине местных потерь при выборе оптимальных параметров гидравлических систем, как это показано в работе [5]. Проведение подобных расчетов и внедрение подобной методологии для других видов соединительных элементов трубопроводов позволит в дальнейшем сформировать базу знаний и учитывать местные сопротивления при проектировании системы на этапе эскизного проектирования без проведения масштабного моделирования. Дальнейшее усовершенствование методики заключается в усложнении и уточнении расчетных моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dunker C. et al.* Architecture and Parameter Optimization for Aircraft Electro-Hydraulic Power Generation and Distribution Systems // Proc. of the AeroTech Congress & Exhibition, Sept. 22–24, 2015, Seattle, USA. Technical Paper № 2015-01-2414.
2. *Исаев С.А. и др.* Гидродинамика и теплообмен в щелевых каналах с перспективными поверхностными интенсификаторами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 146–152.
3. *Лобанов И.Е.* Гидравлическое сопротивление в трубах с непостоянной шероховатостью // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 52–56.
4. *Ковалев М.А.* Метод автоматизации процесса моделирования гидросистем воздушных судов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 3. С. 62–66.
5. *Бобарика И.О., Груздев А.С.* Методика оптимизации гидросистемы на этапе эскизного проектирования с помощью генетического алгоритма NSGA-II // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 140–147.
6. *Альтиуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
7. *Альтиуль А.Д.* Гидравлические потери на трение в трубопроводах. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. 256 с.
8. *Киселев П.Г. и др.* Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1972. 312 с.
9. *Ильина Т.Н.* Основы гидравлического расчета инженерных сетей. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2005. 186 с.
10. *Спышинов П.А., Шнееров А.И.* Справочник по внутренним водопроводу, канализации и водостокам. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. 416 с.
11. *Dongxu Liu et al.* Experimental Study of Loss Coefficients for Laminar Oil-Water Two-Phase Flow through Micro-Scale Flow Restrictions // Experimental Thermal and Fluid Science. 2023. Vol. 140. Article № 110747.
12. *Кузнецов В.С., Шабловский А.С., Яроц В.В.* Экспериментальное определение коэффициентов гидравлических сопротивлений. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 21 с.
13. *Наумов В.А.* Инженерный метод расчета коэффициента гидравлических потерь при транспортировании водорыбной смеси по трубам // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. № 1. С. 20–28.
14. *Анциферов С.А., Филенков В.М.* Аprobация экспериментального стенда для определения гидравлического сопротивления шероховатой трубы // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 10–15.

15. Матвеев А.М., Зверев И.И. Проектирование гидравлических систем летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 296 с.
16. Аксенов А.А. и др. Расчетные исследования процесса перемешивания неизоотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. № 1. С. 95–110.
17. Михеев Н.И., Душин Н.С., Заринов Д.И. Пульсации потока в области разветвления канала // Труды Академэнерго. 2011. № 2. С. 24–32.
18. Заринов Д.И., Михеев Н.И., Душин Н.С. Метод моделирования течения жидкости в разветвленных каналах // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 23–27.
19. Igarashi M. et al. Experimental Study on Fluid Mixing for Evaluation of Thermal Striping in T-Pipe Junction // Proc. of the 10th International Conference on Nuclear Engineering, April 14–18, 2002, Arlington, USA. P. 383–390.
20. Utanohara Y., Miyoshi K., Nakamura A. Conjugate Numerical Simulation of Wall Temperature Fluctuation at a T-Junction Pipe // Bulletin of the JSME “Mechanical Engineering Journal”. 2018. Vol. 5. № 3. P. 1–23.
21. Kamide H. et al. Study on Mixing Behavior in a Tee Piping and Numerical Analyses for Evaluation of Thermal Striping // Nuclear Engineering and Design. 2009. Vol. 239. Iss. 1. P. 58–67.
22. Qian S., Kanamaru S., Kasahara N. High-Accuracy CFD Prediction Methods for Fluid and Structure Temperature Fluctuations at T-Junction for Thermal Fatigue Evaluation // Nuclear Engineering and Design. 2015. Vol. 288. P. 98–109.
23. Zhou M., Kulenovic R., Laurien E. Experimental Investigation on the Thermal Mixing Characteristics at a 90° T-Junction with Varied Temperature Differences // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 128. P. 1359–1371.
24. Zhou M., Kulenovic R., Laurien E. T-Junction Experiments to Investigate Thermal-Mixing Pipe Flow with Combined Measurement Techniques // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 150. P. 237–249.
25. Попов И.А. и др. Численное моделирование системы смазки авиационных поршневых двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 94–100.
26. Баица Т.М., Никитин Г.А., Комаров А.А. Гидравлические и пневматические устройства летательных аппаратов (Курс лекций). Киев: Киевский ин-т инженеров гражд. авиации, 1967. Т. 1. 170 с.
27. Артамонов Н.И. и др. Экспериментальное исследование местной теплоотдачи и гидравлического сопротивления при охлаждении газа в трубе // Теплофизика высоких температур. 1970. № 6. С. 1228–1234.
28. Варава А.Н. и др. Исследование гидравлического сопротивления и теплообмена в однофазном закрученном потоке при одностороннем нагреве // Теплофизика высоких температур. 2006. № 5. С. 699–708.
29. Туркина А.В. Исследование влияния температуры нагрева нефти на гидравлическое сопротивление в трубопроводе при перекачке высоковязких нефтей // Форум молодых ученых. 2018. № 12 (28). С. 177–183.

Поступила в редакцию 15.05.24

После доработки 8.09.24

Принята к публикации 17.09.24

## Determination of the Local Loss Coefficient of Connecting Elements of Aviation Hydraulic Systems Based on a Virtual Experiment

I.O. BOBARIKA, A.S. GRUZDEV, AND I.O. PADURAR'

ISTU, Irkutsk

*The paper examines the possibility of using the virtual experiments in the FloEFD for Siemens NX and Femap software packages to determine the local loss coefficients in the connecting elements of aviation hydraulic systems. To verify the methodology, experiments were conducted on typical connecting elements. According to the developed methodology, local resistances of a tee-type hydraulic connector were studied during its operation in various modes. Based on the experimental results, flow distribution patterns inside the studied connectors and local loss coefficient values were obtained, and conclusions were made about the possibility of using the virtual experiments to solve such problems. The paper also describes a virtual experiment to determine temperature deformations in hydraulic connectors, and a conclusion is made about the absence of the need to take temperature deformations into account when calculating local loss coefficients.*

**Pressure losses, local resistances, hydraulic systems, virtual experiment**