

УДК 629.12

Васькин Сергей Владимирович¹, к.т.н., доцент
e-mail: serwaskin@mail.ru

Кожевников Дмитрий Сергеевич¹, магистрант
e-mail: diman.kojevnikov@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

Аннотация. При проектировании судовых систем важное внимание уделяется проведению гидравлических расчетов, в результате которых устанавливаются фактические скорости движения рабочей среды по трубопроводам системы, определяются потери давления в системе при различных режимах ее работы, а также выбирается необходимое насосное оборудование. Гидравлический расчет сложных систем является достаточно трудоемкой задачей. В настоящее время существует большое количество программных продуктов, обеспечивающих автоматизацию этих расчетов. Данная статья посвящена исследованию возможности применения для этих целей программы «Гидросистема».

Ключевые слова: проектирование судов, гидравлические расчеты систем, автоматизация гидравлических расчетов, коэффициенты сопротивлений, характеристики насосов.

Гидравлические расчеты судовых систем являются важной и трудоемкой задачей при проектировании судна. Они позволяют определить сопротивление системы, диаметры труб, требуемый напор и мощность насоса. Тщательно выполненный расчет позволяет исключить излишнюю установленную мощность оборудования, сэкономить на материалах для монтажа трубопроводов. В конечном счёте, снижается масса и стоимость оборудования, а, следовательно, и стоимость постройки и эксплуатации судна. Вместе с развитием технологий судостроения возникла необходимость автоматизации этих расчетов.

Современный рынок программных продуктов предлагает как относительно простое ПО для выполнения гидравлических расчетов несложных систем, такое как «ГидРаВПТ», «Стокс» и т.д. [4, 5], так и достаточно сложные, например, «Zulu*» и «Гидросистема» [6, 7]. Тем не менее, все предложенные программы имеют исследовательское или общепромышленное назначение и не специализируются на расчетах судовых систем. В учебном процессе ФГБОУ ВО «ВГУВТ» с 2006 г. для ознакомления студентов с возможностями автоматизации проведения гидравлических расчетов и получения соответствующих практических навыков используется программа «Гидросистема» [8].

Целью данного исследования является выполнение гидравлического расчета судового трубопровода в программе «Гидросистема» и аналитическим способом в соответствии с [2] для сопоставления результатов и оценки пригодности этой программы для выполнения такого рода задач.

Рассматриваемая программа относится к ПО широкого применения и может использоваться при проектировании и реконструкции объектов в энергетике, нефтеперерабатывающей и нефтехимической, газовой, нефтяной, химической и других

отраслях промышленности, для расчёта технологических, магистральных трубопроводов, тепловых, газораспределительных и других инженерных сетей. Она позволяет рассчитывать надземные, подземные и комбинированные трубопроводные системы произвольной сложности (в том числе с кольцевыми участками). Результаты расчёта помогают правильно выбрать насосы, компрессоры, регулирующие и предохранительные клапаны, обеспечить работоспособность трубопроводных систем и оптимизировать капитальные затраты.

Программа производит следующие виды расчётов:

- гидравлический расчёт изотермического течения (без расчёта изменения температуры продукта);
- проектный расчёт (выбор диаметров);
- теплогидравлический расчёт (с расчётом изменения температуры продукта и теплопотерь в окружающую среду);
- расчёт переходных процессов (гидроудара).

В качестве прототипа для данного исследования была выбрана система водяного пожаротушения сухогрузного теплохода проекта RSD59 со следующими технико-эксплуатационными характеристиками:

- класс КМ⊗ Ice2 R2 AUT1-ICS;
- длина наибольшая: 140,88 м;
- длина между перпендикулярами: 137,08 м;
- ширина: 16,98 м;
- высота борта: 6,00 м;
- осадка: 3,6 м;
- дедвейт: 5320 т;
- двигатели: 2 дизеля мощностью по 1200 кВт;
- скорость хода: 10,2 уз;
- автономность плавания: 12 суток;
- экипаж: 10–11 чел.

На первом этапе работы было определено количество пожарных насосов, их минимальная производительность, а также давление у пожарных кранов. В зависимости от назначения судна-прототипа и его валовой вместимости в соответствии с п. 3.2.1.1 Правил [1] на судне необходима установка двух пожарных насосов. Минимальное давление у кранов при работе системы на основании требования того же пункта было принято равным 0,27 МПа.

Минимальная суммарная производительность насосов определяется по формуле 3.2.1.5 [1]:

$$Q = km^2 = 0,008 \cdot 119,29^2 = 113,84 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где $m = 1,68\sqrt{L(B+D)} + 25 = 1,68\sqrt{137,08 \cdot (16,98 + 6)} + 25 = 119,29 \text{ м}^3/\text{ч}$;

$k = 0,008$ – коэффициент, зависящий от типа судна;

L, B и D – соответственно длина, ширина и высота борта судна, м.

При этом в соответствии с п.3.2.1.10 [1] каждый стационарный насос должен иметь подачу не менее 80% общей требуемой подачи, деленной на требуемое число насосов, но не менее 25 м³/ч. В нашем случае минимальная производительность составила:

$$Q_{\min} = \frac{0,8Q}{n} = \frac{0,8 \cdot 113,84}{2} = 45,54 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2)$$

В соответствии с п.3.2.4.7 [1] подача от одного пожарного ствола диаметром насадки 19 мм составляет $q = 23,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении у кранов 0,27 МПа.

Таким образом, количество одновременно работающих потребителей было найдено как отношение общей требуемой подачи к расходу воды через один пожарный ствол:

$$N_{\text{ПК}} = \frac{Q}{q} = \frac{113,84}{23,5} = 4,84 \text{ шт.} \quad (3)$$

В таком случае минимально необходимая подача, определенная по формуле (1), должна обеспечивать единовременную работу 5 кранов.

На втором этапе была выполнена трассировка трубопроводов системы пожаротушения с учетом фактических длин ее отдельных участков и их высотного расположения. Размещение пожарных кранов (ПК) на судне определялось исходя из требований, изложенных в [1], а именно:

- необходимости обеспечить подачу воды от двух кранов до любой части судна;
- размещения кранов на расстоянии не более 20 м друг от друга для внутренних помещений и не более 30 м на открытых палубах;
- необходимости размещения в машинном помещении не менее двух ПК.

Трассировка системы на чертеже общего вида судна и ее трехмерная модель, выполненные в САПР «Компас–3D», представлены на рисунках 1 и 2.

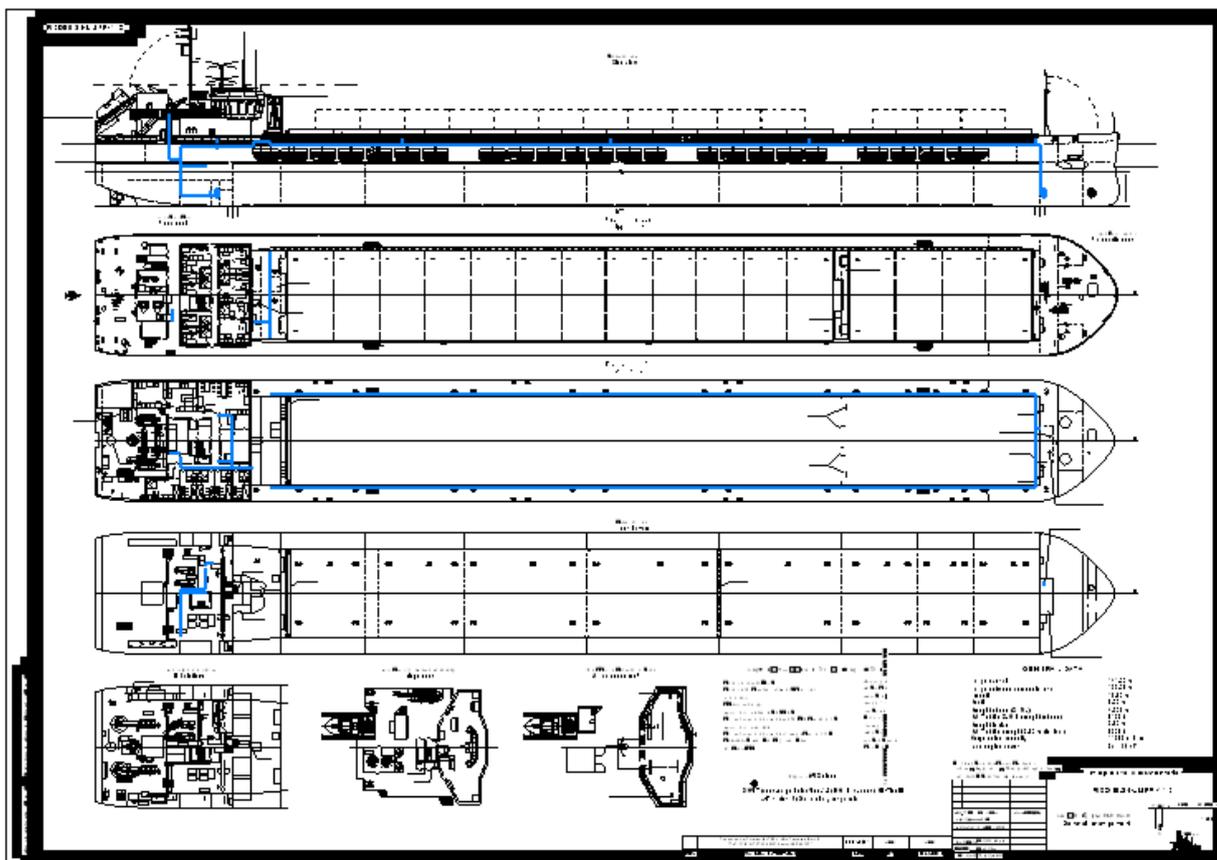


Рисунок 1 – Размещение трубопровода на чертеже общего вида судна

После нахождения основных характеристик и определения расположения системы пожаротушения на судне, был выполнен ее гидравлический расчет с использованием методики, содержащейся в отраслевом руководящем документе [2], а также аналогичный расчет с использованием программы «Гидросистема». Целью расчетов являлся выбор насосов, обеспечивающих необходимые давления и расходы воды у ПК при различных режимах работы системы.

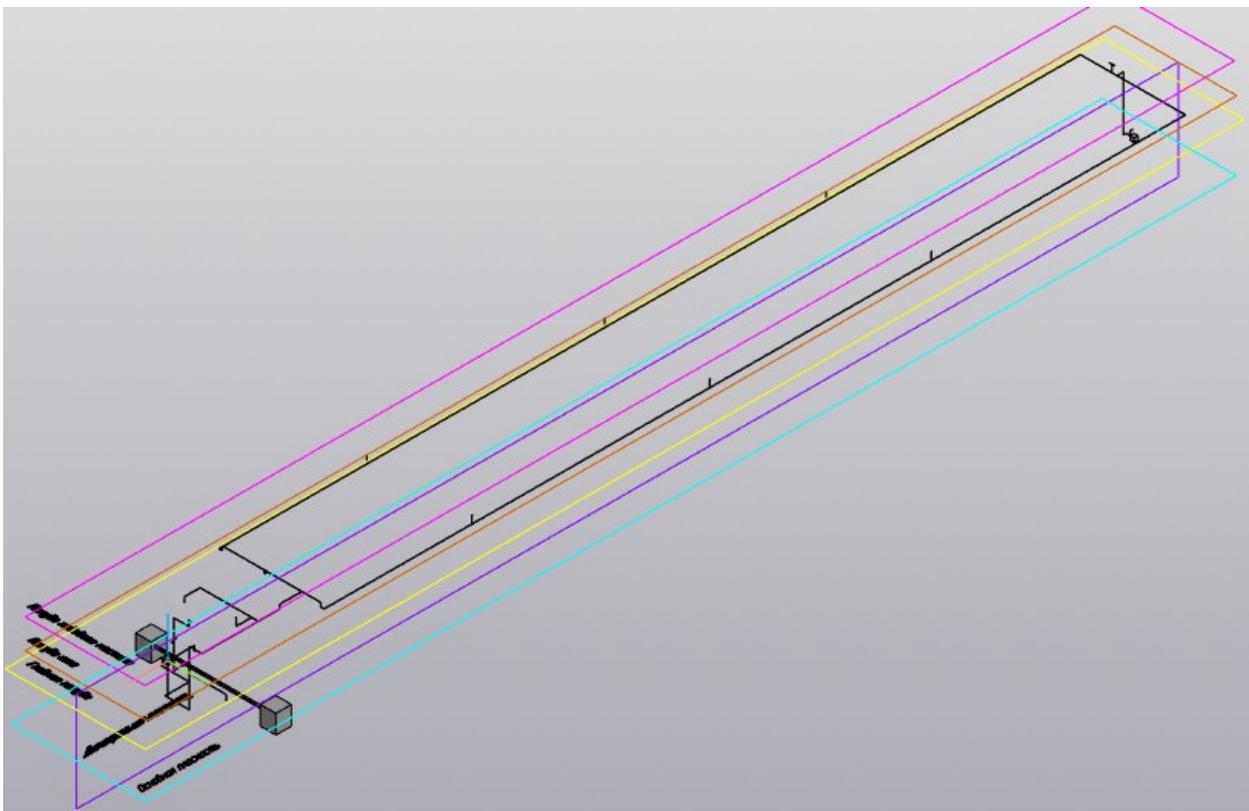


Рисунок 2 – 3D-модель системы в КОМПАС-3D

Представленная в [1] методика предполагает проведение расчетов в форме таблицы, для чего удобно воспользоваться приложением MS Office Excel. Расчет предполагает вычисление по заданным расходам и диаметрам трубопроводов на участках скоростей движения воды, чисел Рейнольдса, коэффициентов сопротивления трения, потерь напора на трение и в местных сопротивлениях, а также потерь на подъем жидкости.

Коэффициенты местных сопротивлений определяются в соответствии с содержащимися в [2] приложениями.

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Процесс расчета даже с использованием электронных таблиц является весьма трудоемким, поскольку для большого количества местных сопротивлений значения соответствующих коэффициентов ζ зависят от расходов рабочей среды, скоростей движения, чисел Рейнольдса, относительной шероховатости трубопроводов и их внутренних диаметров, а также других параметров. Это приводит к тому, что коэффициенты ζ для одних и тех же трубопроводных элементов на различных участках имеют различные, иногда очень сильно отличающиеся, значения.

Еще одной трудностью, возникающей при ручном расчете, является определение расходов рабочей среды по кольцевым трубопроводам. При наличии таких участков практически невозможно сразу определить распределения расходов по отдельным их

ветвям. В этом случае расчет выполняют методом последовательных приближений, каждое из которых требует уточнения коэффициентов трения и местных сопротивлений.

Кроме того, выбор насосного оборудования определяется при работе системы в наиболее тяжелых условиях, которым соответствуют наибольшие возможные расходы и потери давления рабочей среды на ее участках.

Результаты расчета системы пожаротушения по методике [2]

Наименование	Обозначение	Ед. измерения		1-3	2-3	3-4	4-5	5-6	5-9	10-9	9-21	4-7	8-7	7-21	21-40	
Расход воды	Q	м3/ч		23,5	23,5	47	15,2	23,5	38,7	23,5	62,2	31,8	23,5	55,3	117,5	
Температура воды	t	°C	10													
Плотность воды	ρ	кг/м3	1000													
Вязкость воды	ν	м2/с	1,31E-06													
Давление у ПК	Pк	кПа	270													
Диаметр трубопровода	d	м		0,065	0,065	0,08	0,1	0,065	0,1	0,065	0,1	0,1	0,065	0,1	0,1	
Средняя скорость воды	v	м/с	$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}$	1,96	1,96	2,59	0,54	1,96	1,37	1,96	2,20	1,12	1,96	1,95	4,15	
Число Рейнольдса	Re		$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$	97699	97699	158761	41075	97699	104580	97699	168084	85934	97699	149438	317523	
Абсолютная шероховатость труб	Δ	м	0,0002													
Коэффициент сопротивления трения	λ		$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$	0,02726	0,02726	0,02559	0,02705	0,02726	0,02496	0,02726	0,02436	0,02528	0,02726	0,02449	0,02342	
Длина участка	l	м		0,2	0,2	0,9	35,3	0,9	27,3	0,9	57	35,3	0,9	78,1	31,7	
Потери давления на трение	pтр	кПа	$p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$	0,162	0,162	0,968	1,376	0,728	6,365	0,728	33,504	5,629	0,728	36,476	63,933	
Сумма к-тов местного сопротивления	Σζ			2,9	2,9	0	8,97	1,1	0,158	1,3	6,08	2,104	1,78	7,042	8,28	
Потери давления в местных сопротивлениях	pм	кПа	$p_{\text{м}} = \Sigma \zeta \cdot \frac{\rho v^2}{2}$	5,596	5,596	0,000	1,293	2,123	0,148	2,509	14,672	1,327	3,435	13,432	71,302	
Потери давления на подъем	pг	кПа		0	0	8,83	0	8,83	0	8,83	-4,91	0	8,83	-4,91	75,54	
Потери давления по участкам	Pу	кПа	Pу = pтр + pм + pг	5,758	5,758	9,798	2,669	11,681	6,513	12,067	43,266	6,957	12,993	44,998	210,775	
Давления в узловых точках		кПа					18,225		24,737		68,003	22,513		67,510		
				Среднее давление в узловой точке 21												278,532
Давление насоса при движении воды по участкам	Pн	кПа	Pн = Pк + Pу												548,532	



С учетом большого количества комбинаций включения в работу отдельных потребителей (ПК), нахождение таких условий также является непростой задачей.

При расчете трубопроводов с использованием программы «Гидросистема» указанных выше трудностей удастся во многом избежать. Это объясняется тем, что программа при заданных давлениях в начальной и конечных точках автоматически рассчитывает фактические расходы по всем рабочим участкам системы, в т.ч. по кольцевым. При изменении давлений расходы пересчитываются с учетом изменения коэффициентов местных сопротивлений ζ и коэффициентов трения λ .

Проблема выбора наиболее тяжелого режима работы остается, но решается проще, благодаря возможности быстрого включения или выключения отдельных потребителей для повторных расчетов.

В результате проведенных расчетов наиболее тяжелым оказался режим работы системы, при котором вода подается к пяти пожарным кранам, расположенным в носовой оконечности в точках 1, 2, 6, 8 и 10.

Перед началом расчета были назначены единицы измерения, характеристики среды и граничные условия, после чего была задана расчетная схема, показанная на рисунке 3.

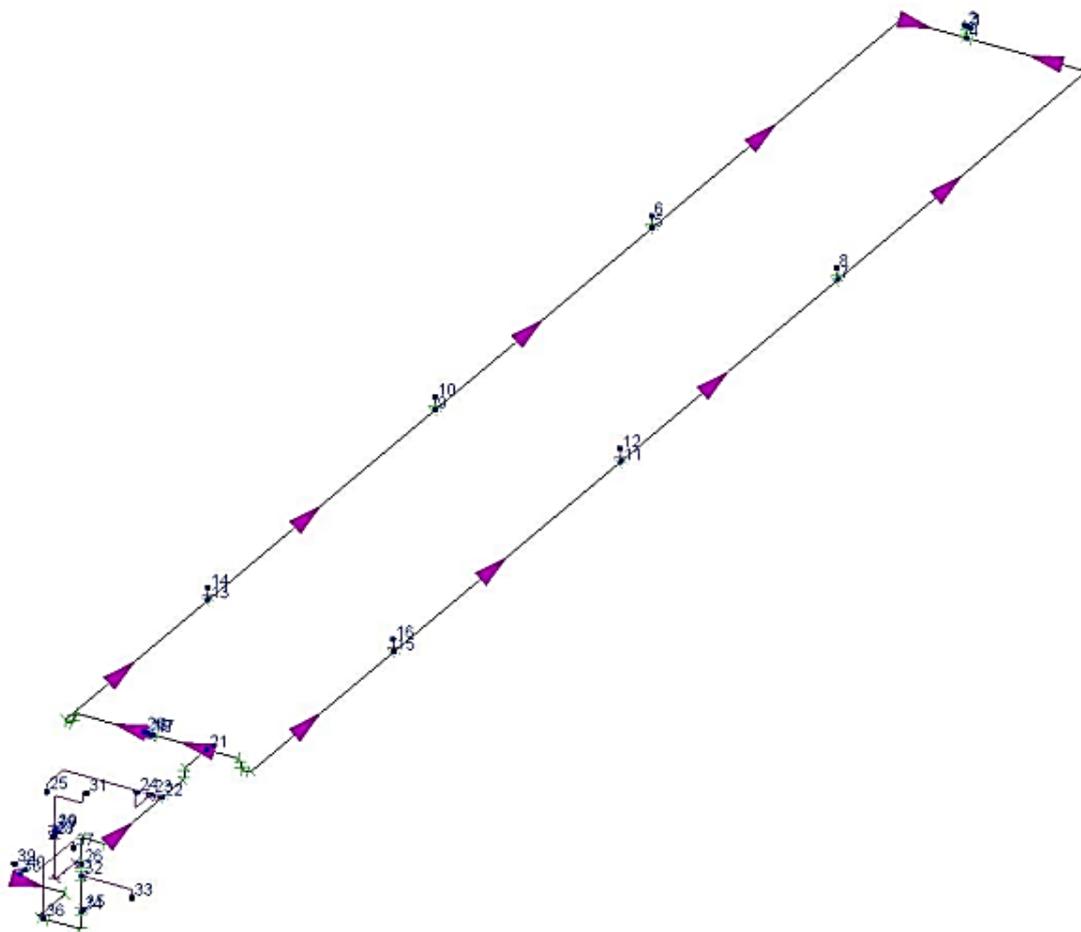


Рисунок 3 – Расчетная схема трубопровода в программном комплексе «Гидросистема»

После построения схемы, задания ограничений по скорости, давлений у кранов и насосов, диаметров труб и расходов по участкам, был запущен изотермический расчет, результаты которого представлены в таблице 2.



Результаты расчета в программе «Гидросистема»

Наименование трубопровода: Трубопровод															
Гидравлический расчет															
№№ п/п	Ветвь	Продукт	Расход, м3/час	Длина, м	Диам. мм	Максимальн.		Потери давления, кПа			Давление (абс.), МПа		Температура, °С		Кавит. зап., м
						Скор. м/с	Плотн. кг/м3	Трение	Местные	Подъем	нач.	кон.	нач.	кон.	
1	40-38	Вода	117.4	0.6	100	4.15	999.96	1.209	4.470		0.63600	0.63032	10.00	10.00	
3	38-36	Вода	117.4	8.4	100	4.15	999.95	16.937	38.362		0.63032	0.57502	10.00	10.00	
5	36-34	Вода	117.4	4.0	100	4.15	999.93	8.131	3.137	13.242	0.57502	0.55051	10.00	10.00	
7	34-32	Вода	117.4	2.7	100	4.15	999.92	5.440	0.164	26.485	0.55051	0.51842	10.00	10.00	
15	26-22	Вода	117.4	10.7	100	4.15	999.89	21.500	6.110	19.127	0.50483	0.45809	10.00	10.00	
19	22-21	Вода	117.4	6.3	100	4.15	999.87	12.635	5.946	7.847	0.45809	0.43166	10.00	10.00	
20	21-15	Вода	55.8	21.9	100	1.98	999.86	10.069	10.758	-7.847	0.43166	0.41868	10.00	10.00	
21	21-17	Вода	61.5	3.9	100	2.18	999.86	2.170	8.799		0.43166	0.42069	10.00	10.00	
25	17-13	Вода	61.5	25.2	100	2.18	999.85	14.023	5.418	-7.847	0.42069	0.40910	10.00	10.00	
27	15-11	Вода	55.8	28.6	100	1.98	999.85	13.145	0.037		0.41868	0.40550	10.00	10.00	
29	13-9	Вода	61.5	28.6	100	2.18	999.85	15.910			0.40910	0.39319	10.00	10.00	
31	11-7	Вода	55.8	27.3	100	1.98	999.85	12.548			0.40550	0.39295	10.00	10.00	
32	9-10	Вода	23.5	1.1	65	1.96	999.84	0.828	12.578	9.784	0.39319	0.37000	10.00	10.00	
33	9-5	Вода	38.0	27.3	100	1.35	999.84	5.897	0.121		0.39319	0.38717	10.00	10.00	
34	7-8	Вода	23.6	1.1	65	1.98	999.84	0.841	12.328	9.784	0.39295	0.37000	10.00	10.00	
35	7-4	Вода	32.2	39.9	100	1.14	999.84	6.231	2.973		0.39295	0.38375	10.00	10.00	
36	5-6	Вода	23.8	1.1	65	1.99	999.84	0.851	6.538	9.784	0.38717	0.37000	10.00	10.00	
37	5-4	Вода	14.2	36.1	100	0.50	999.84	1.182	2.245		0.38717	0.38375	10.00	10.00	
38	3-2	Вода	23.2	0.2	65	1.94	999.83	0.154	3.843		0.37400	0.37000	10.00	10.00	
39	3-1	Вода	23.2	0.2	65	1.94	999.83	0.154	3.843		0.37400	0.37000	10.00	10.00	
40	4-3	Вода	46.4	0.9	80	2.57	999.84	0.923		8.828	0.38375	0.37400	10.00	10.00	
						RSD59-СВП сводные результаты									
						Система водяного пожаротушения									
						Изм.	Кол.уч	Лист	Идок.	Подп.	Дата				
						Разработал	Кожевников			Гидравлический расчет системы водяного пожаротушения			Стадия	Лист	Листов
						Проверил	Васькин							1	2
						Расчет трубопровода по программе Гидросистема 4.3 Результаты по ветвям						ВГУВТ К(М) -2			



Необходимое избыточное давление пожарного насоса при требуемом расходе, полученное в программе «Гидросистема», составило 0,536 МПа. При расчете этого режима с использованием MS Excel требуемое давление оказалось равным 0,548 МПа. То есть разность расчетных давлений составила 0,012 МПа или 2,2%, что можно считать удовлетворительным результатом.

Важной особенностью программы «Гидросистема» является возможность включения в схему насосного оборудования и определение фактического режима работы насоса. При установке в качестве пожарных двух параллельно работающих насосов марки НЦВ 63/80, как это предусмотрено на судне-прототипе, было установлено, что при одновременной их работе фактический расход значительно превышает необходимый. Это приводит к повышению потребляемой насосом мощности (по 26,5 кВт каждый) и превышению скорости движения среды на напорном участке (5,62 м/с при максимально допустимой 4 м/с). Для обеспечения требуемых расходов и скорости можно применить дросселирование насосов путем установки диафрагмы на напорном трубопроводе. При этом «Гидросистема» позволяет подобрать диаметр отверстия в диафрагме, при котором обеспечиваются требуемые расходы. В этом случае мощность каждого насоса снижается до 22 кВт. Более выгодным является использование двух параллельных насосов другой марки, например, К100-65-200, потребляемая мощность которых при расчетной производительности составляет всего 17 кВт на каждый насос.

Заключение

В результате работы были выявлены некоторые отличия в расчетах, касающиеся потерь давления в отдельных элементах системы. ПО «Гидросистема» считает потери при движении рабочей среды по методикам, указанным в [3]. В частности, потери на трение на участках трубопровода, найденные программой, несколько превышали аналогичные потери, полученные в результате ручных вычислений. Вместе с этим потери давления в местных сопротивлениях у «Гидросистемы» получились ниже на 15...20%. Это объясняется тем, что программа, например, считает отводы изогнутыми участками труб и учитывает потери в них, как потери на трение, в то время как в методике [2] эти потери добавляются к коэффициентам местного сопротивления. Кроме того, в методиках расчета коэффициентов местных сопротивлений, содержащихся в [2] и [3], имеются некоторые отличия. В целом же суммарные потери давления при расчетах обоими способами оказываются примерно равными.

Подводя итоги можно сказать, что использовать программу «Гидросистема» целесообразно для расчета сложных судовых систем, например, как в рассмотренном случае, с кольцевыми участками или перемычками. Также целесообразно использовать программу в случаях, когда необходимо рассмотреть несколько вариантов работы системы (для выбора оптимальных диаметров труб при одинаковой конструкции системы, лучшего набора арматуры, для рассмотрения разных вариантов открытия запорной арматуры и т.д.).

Для расчета относительно простых с точки зрения конфигурации и режимов работы систем предпочтительным будет являться использование ручного метода.

Список литературы:

1. Правила постройки и классификации морских судов в 4-х томах, Российский Морской Регистр Судоходства, 2021 г.
2. РД5.76.038–84 – Методика гидравлических расчетов судовых разветвленных трубопроводов.

3. Идельчик И.Е. – Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. «Стокс – простая программа для гидравлического расчёта кольцевых и тупиковых сетей трубопроводов», официальный сайт, <https://pipecalc.ru/ru/>.
5. «ГидРаВПТ – Программа для проведения гидравлического расчета установок водяного пожаротушения», официальный сайт, <https://gidravpt.ru/>.
6. Официальный сайт компании ПолиTERM, разработчика программ Zulu, <https://www.politerm.com/>.
7. Официальный сайт НТП «Трубопровод». Программное обеспечение. Программа для теплогидравлического расчёта трубопроводных систем и выбора диаметров «Гидросистема». <https://www.truboprovod.ru/software/hst>.
8. Васькин С.В. Использование программы «Гидросистема» при проведении гидравлических расчетов судовых систем. Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Информационные технологии в учебном процессе». – Н.Новгород: Изд-во НГТУ, 2007. с. 154–159.

AUTOMATION OF HYDRAULIC CALCULATIONS OF SHIP SYSTEMS

Sergey V. Vas'kin, Dmitriy S., Kozhevnikov

Annotation. When designing ship systems, important attention is paid to carrying out hydraulic calculations, as a result of which the actual speeds of the working medium through the pipelines of the system are established, pressure losses in the system are determined under various operating modes, and the necessary pumping equipment is selected. Hydraulic calculation of complex systems is a rather time-consuming task. Currently, there are a large number of software products that automate these calculations. This article is devoted to the study of the possibility of using the "Hydrosystem" program for these purposes.

Keywords: ship design, hydraulic calculations of systems, automation of hydraulic calculations, resistance coefficients, pump characteristics.