УДК 539.422.52+519.688

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

DEVELOPMENT OF A QUALITY MANAGEMENT TOOL FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS

Дубинов Юрий Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металловедения
и неметаллических материалов,
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
dubinov.y@gubkin.ru

Гололобов Денис Владимирович
старший преподаватель кафедры стандартизации,
сертификации и управления качеством производства
нефтегазового оборудования,
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
dgololobov@mail.ru

Селезнева Резеда Рафисовна
ассистент кафедры стандартизации, сертификации
и управления качеством производства нефтегазового
оборудования,
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
gabdullova.r@gubkin.ru

Ясашин Виталий Анатольевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Профессор кафедры стандартизации, сертификации
и управления качеством производства нефтегазового
оборудования,
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
yasashin.v@gubkin.ru

Аннотация. В работе представлена разработка программного инструмента управления качеством производства изделий из композиционных материалов, используемых в нефтегазовой отрасли. На основе экспериментальных исследований стеклопластика и углепластика разработаны расчетные алгоритмы определения предела прочности в зависимости от вида среды, кислотности среды и ориентации армирующих волокон. Алгоритмы реализованы в среде SMath Solver и обеспечивают возможность оперативной оценки прочностных характеристик материалов с учетом эксплуатационных факторов. Предложенный подход позволяет повысить обоснованность управленческих решений на стадии производства и перейти от контроля готовой продукции к управлению формированием свойств материала.

Ключевые слова: композитные материалы, стеклопластик, углепластик, предел прочности, управление качеством, эксплуатационные среды, pH, ориентация волокон, математическое моделирование.

Dubinov Iurii Sergeevich
Ph.D. of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department of physical metallurgy and non-metal materials,
Gubkin Russian State University
of Oil and Gas
dubinov.y@gubkin.ru

Gololobov Denis Vladimirovich
Senior Lecturer at the Department
of standartization, sertification and quality management of production of oil and gas equipment,
Gubkin Russian State University
of Oil and Gas
dgololobov@mail.ru

Selezneva Rezeda Rafisovna
Assistant of the Department
of standartization, sertification and quality management of production of oil and gas equipment,
Gubkin Russian State University
of Oil and Gas
gabdullova.r@gubkin.ru

Yasashin Vitaly Anatolyevich
Grand PhD in Engineering sciences,
Senior Researcher,
Professor of the Department
of standartization, sertification and quality management of production of oil and gas equipment,
Gubkin Russian State University
of Oil and Gas
yasashin.v@gubkin.ru

Annotation. The paper presents the development of a software quality management tool for the production of composite materials used in the oil and gas industry. Based on experimental studies of fiberglass and carbon fiber, computational algorithms have been developed for determining the ultimate strength depending on the type of medium, the acidity of the medium, and the orientation of the reinforcing fibers. The algorithms are implemented in the SMath Solver environment and provide the ability to quickly assess the strength characteristics of materials, taking into account operational factors. The proposed approach makes it possible to increase the validity of management decisions at the production stage and move from controlling finished products to managing the formation of material properties.

Keywords: composite materials, fiberglass, carbon fiber, tensile strength, quality management, operating environment, pH, fiber orientation, mathematical modeling.

Современное развитие нефтегазовой отрасли характеризуется расширением применения композиционных материалов в трубопроводных системах. Это обусловлено их высокой прочностью, коррозионной стойкостью и снижением эксплуатационных затрат. Однако в отличие от металлических материалов, свойства композитов существенно зависят от технологических параметров производства и условий эксплуатации, что требует разработки методов управления качеством, учитывающих данные факторы [1–3].

В рамках настоящего исследования разработан инструмент расчета прочностных характеристик композитных материалов на основе экспериментальных данных. Основные положения алгоритма и структура исходных данных приведены в исходном материале.

Для оценки влияния среды выдержки на предел прочности разработан алгоритм, основанный на использовании матричного представления исходных данных. Исходные данные задаются в виде трёх вектор-столбцов (рис. 1):

Исходные данные расчета:

$$I := \begin{bmatrix} \text{"Нефть"} \\ \text{"Соль NaCl"} \\ \text{"Кислота CH3-CO(OH)"} \end{bmatrix} \quad Mk := \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad MT := \begin{bmatrix} \text{"Углепластик"} \\ \text{"Стеклопластик"} \end{bmatrix}$$

Рисунок 1 – Исходные данные для расчета предела прочности образцов по критерию вида среды

В качестве исходных параметров данные представлены в виде вектор-столбцов. Первый вектор-столбец описывает возможные варианты используемых сред, второй вектор-определяет использование расчетных коэффициентов, зависимых от вида сред, третий вектор-столбец определяет используемые материалы образцов. Моделирование расчета ведется с использованием Smath Solver. Для реализации последующего расчета пользователю программного решения алгоритма предлагается выбрать используемую среду (рис. 2) и выбрать материал для образца труб (рис. 3).

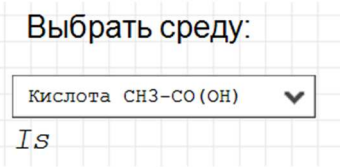

Рисунок 2 – Выбор вида среды из перечня данных вектор-столбца I

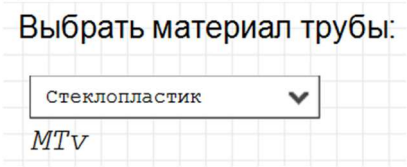

Рисунок 3 – Выбор материала образца трубы из возможных в вектор-столбце MT

Тогда в алгоритме расчета идет перебор возможных вариантов решения, где переменные Is и MTv (см. рис. 2 и 3) передают в расчетный алгоритм положения выбранных элементов из вектор-столбцов I и MT соответственно (см. рис. 1). Таким образом расчетный алгоритм основывается на переборе возможных вариаций с подстановкой соответствующих коэффициентов в расчетные формулы за счет строк матрицы Мк (см. рис.1). Таким образом расчетный алгоритм представляет собой следующие условия (рис. 4):

```
if (Is = 1)∧(MTv = 1)                                                    = 193,6
  σ := 202,71 + 33,91·Mk_11 + 52,92·Mk_12 + 92,95 + Mk_13
else
  if (Is = 2)∧(MTv = 1)
    σ := 202,71 + 33,91·Mk_21 + 52,92·Mk_22 + 92,95 + Mk_23
  else
    if (Is = 3)∧(MTv = 1)
      σ := 202,71 + 33,91·Mk_31 + 52,92·Mk_32 + 92,95 + Mk_33
    else
      if (Is = 1)∧(MTv = 2)
        σ := 174,11 − 37,68·Mk_11 + 10,89·Mk_12 + 19,49·Mk_13
      else
        if (Is = 2)∧(MTv = 2)
          σ := 174,11 − 37,68·Mk_21 + 10,89·Mk_22 + 19,49·Mk_33
        else
          σ := 174,11 − 37,68·Mk_31 + 10,89·Mk_32 + 19,49·Mk_33
```

Рисунок 4 – Расчетный алгоритм предела прочности материала трубы в зависимости от среды

После компиляции полученного алгоритма в исполняемый файл, пользователь расчета видит рабочий интерфейс расчета (рис. 5).

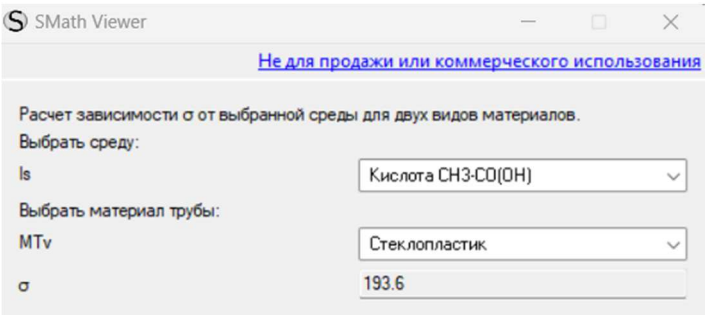

Рисунок 5 – Пользовательский интерфейс расчета

В пользовательском интерфейсе расчета пользователю необходимо выбрать среду из предложенного списка и выбрать материал образца трубы и на выходе будет произведен расчет предела прочности по алгоритму (см. рис. 4).

Второй расчет связан с определением предела прочности образцов труб из углепластика и стеклопластика в зависимости от кислотности среды pH. Исходными данным для расчета являются значение кислотности pH, в рамках проводимых экспериментов рассматривались среды с кислотностью 3, 5, 7, в связи с этим в исходные данные вектор-столбца кислотности среды внесены только эти значения и материал образца (рис. 6).

Тогда для реализации расчета пользователю необходимо дать выбор двух этих параметров (рис. 7).

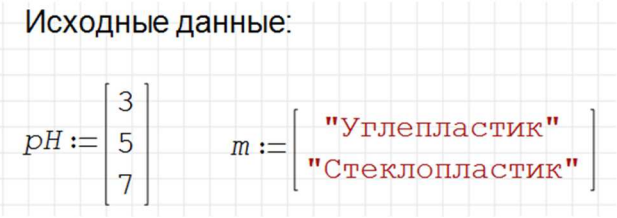

Рисунок 6 – Исходные данные для расчета предела прочности образца материала трубы от кислотности среды pH

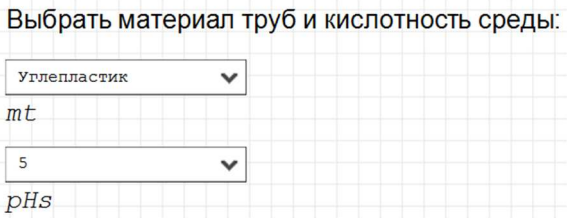

Рисунок 7 – Выбор параметров расчета предела прочности в зависимости от pH

Алгоритм расчета будет зависеть от выбранного материала (см. рис. 6) и переменная выхода этого выбора определяет номер строки выбранного элемента и выбор кислотности среды pH, которая в выходной переменной pHs задает количественное значение кислотности от выбранной строки данных. Тогда ветвление алгоритма расчета связано только с выбором материала (рис. 8).

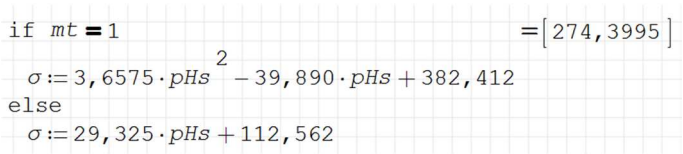

Рисунок 8 – Алгоритм расчета предела прочности материала образца трубы от кислотности среды pH

Тогда пользовательский интерфейс расчета будет представлен следующим образом (рис. 9):

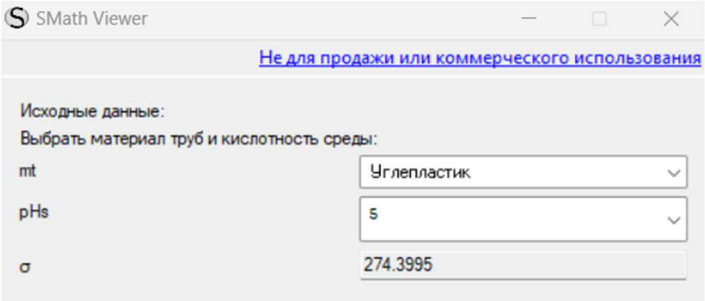

Рисунок 9 – Пользовательский интерфейс расчета предела прочности в зависимости от кислотности среды

В выпадающих окнах выбирается материал образца и кислотность среды из векторов данных (см. рис. 6) и на выходе получаем расчет для выбранной ситуации.

Последняя программная реализация расчета предела прочности образца материала трубы от угла расположения волокон в образце. В качестве исходных данных расчета задаются возможные состояния углов и материалов в виде двух вектор-столбцов (рис. 10).

Исходные данные:

$$\Theta := \begin{bmatrix} 45 \\ 60 \\ 90 \end{bmatrix} \qquad m := \begin{bmatrix} \text{"Углепластик"} \\ \text{"Стеклопластик"} \end{bmatrix}$$

Рисунок 10 – Исходные данные для расчета зависимости предела прочности образца труб от угла поворота волокон в образцах

Тогда алгоритм расчета сводят к изменению значений углов и материала образцов (рис. 11).

```
if mt = 1                                                    = [223,5667]
  σ := 0,1772099·Θv^2 − 24,6137037·Θv + 972,3333333
else
  σ := 0,0211358·Θv^2 − 1,2948148·Θv + 153,9
```

Рисунок 11 – Алгоритм определения предела прочности образцов труб в зависимости от угла наклона волокон образца

Критерием выбора ветки расчета является выбираемый материал, а значение углов из вектор-столбца углов подставляют в расчетные формулы. Расчетный интерфейс выглядит следующим образом (рис. 12).

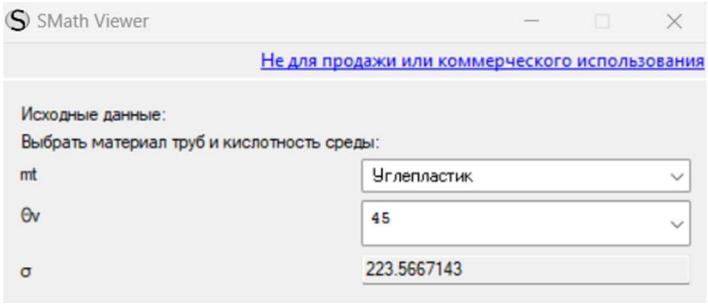

Рисунок 12 – Пользовательский интерфейс расчета зависимости предела прочности материала образца от выбранного угла наклона волокон в образце

Тогда пользователь расчета выбирает материал образца и угол наклона волокон в структуре материала образца и получает расчетное значение предела прочности.

Разработанный инструмент позволяет объединить экспериментальные данные и расчетные зависимости в единую систему, обеспечивающую:

– учет эксплуатационных факторов;
– повышение точности прогнозирования свойств;
– поддержку принятия решений при управлении качеством.

В отличие от традиционного подхода, ориентированного на контроль готовой продукции, предложенный метод обеспечивает управление параметрами формирования структуры материала на стадии производства.

В результате данной работы был разработан программный инструмент расчета предела прочности композитных материалов с учетом эксплуатационных факторов. Установлено, что вид среды, кислотность и ориентация волокон оказывают существенное влияние на прочностные характеристики стекло- и углепластиков. Предложенный алгоритм позволяет учитывать влияние факторов в расчетной форме и использовать результаты для управления качеством производства. Реализация расчетов в программной среде обеспечивает удобство применения и возможность интеграции в производственные процессы. Разработанный подход может быть использован при разработке нормативных требований и технологических регламентов для композитных труб.

Список литературы:

1. Шлюнько И.В., Кондратьева Н.М., Литвинова В.А. Применение стеклопластиковых труб в нефтегазовой отрасли // Избранные докл. 68-й Университетской науч.-технич. конф. студентов и молодых ученых. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2022. – С. 272–274.
2. Изучение угла поворота слоя-матрицы в неметаллических композитах при изготовлении труб и резервуаров для сжиженного природного газа / А.К. Прыгаев, Ю.С. Дубинов, Д.А. Корниенко [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Вып. 1 (141). – С. 214–222. – DOI: http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-1-214-222.
3. Ягубов Э.З., Ягубов З.Х. Проблемы применения композиционных труб в нефтегазовой отрасли и пути их решения // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 4 (53). – С. 33.
4. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – М. : Стандартинформ, 2005. – 9 с.

List of references:

1. Shlyunko I.V., Kondratieva N.M., Litvinova V.A. Application of fiberglass pipes in the oil and gas industry // Selected reports of the 68th University scientific and technical conf. of students and young scientists. – Tomsk : TSUACE Publishing House, 2022. – P. 272–274.
2. Study of the rotation angle of the matrix layer in non-metallic composites in the manufacture of pipes and tanks for liquefied natural gas / A.K. Prygaev, Yu.S. Dubinov, D.A. Kornienko [et al.] // Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products. – 2023. – Issue. 1 (141). – P. 214-222. – DOI: http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-1-214-222.
3. Yagubov E.Z., Yagubov Z.Kh. Problems of using composite pipes in the oil and gas industry and ways to solve them // Academic Journal of Western Siberia. – 2014. – Vol. 10. – № 4 (53). – P. 33.
4. GOST 25.601-80. Strength calculations and tests. Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites). Method of testing flat specimens for tension at normal, elevated, and reduced temperatures. – M. : Standartin-form, 2005. – 9 p.