

УДК 519.6

РАСЧЕТ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ СОПЛЕ ВОЛОКНООБРАЗОВАТЕЛЯ MELT-BLOWN С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА COMSOL

И.А. Лысак, Г.В. Лысак
Институт кибернетики
Томский политехнический университет
г. Томск

С использованием пакета конечно-элементных расчетов COMSOL multiphysics проанализированы аэродинамические процессы, происходящие при истечении рабочей среды из кольцевого сопла волоконнообразователя, предложена математическая модель. Представлены результаты расчета распределения скоростей воздуха в кольцевом конфузурном сопле при различной величине перепада давления.

Ключевые слова: конечно-элементный анализ, кольцевое сопло, аэродинамические процессы

В настоящее время нетканые материалы получаемые раздуванием расплава полимеров широко используются в различных отраслях промышленности [1]. Область применения данных материалов обусловлена их структурой и свойствами, которые зависят от параметров процесса формирования [2,3]. Стадия предпроектных исследований и расчетов является определяющей при разработке современных технологических процессов формования химических волокон, основанных на взаимосвязанном рассмотрении комплекса одновременно действующих сложных физико-химических явлениях при элонгационном течении тонких неизотермических струй расплавов и растворов полимеров. Моделирование является одним из перспективнейших методов изучения этих процессов. В настоящей работе представлены результаты программной имитации аэродинамических процессов, происходящих при истечении теплоносителя из кольцевого сопла волоконнообразователя (КСВ).

При аэродинамическом методе формирования расплавленный полимер (как правило, имеющий очень низкую вязкость) экструдирован через головку специальной конструкции и попадает в сильный поток воздуха, нагретого до высокой температуры. Формирующиеся нити очень быстро вытягиваются и затвердевают в воздушном потоке. Параметры формируемого соплом воздушного потока являются, наряду с вязкостью раствора или расплава полимера, ключевыми факторами, определяющими свойства волокон. Кольцевое сопло образуется при взаимном позиционировании деталей волоконнообразователя

(рис. 1) и представляет собой сужающийся канал ограниченный двумя коаксиальными поверхностями усеченных конусов. Расстояние между конусами (ширина канала), как правило, подбираются однократно и в процессе работы остаются постоянными.

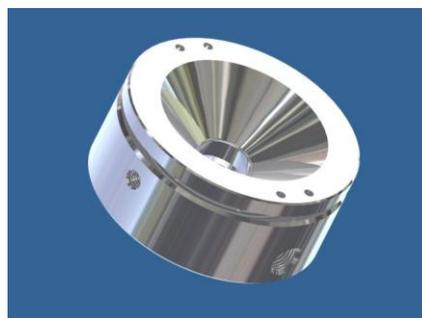


Рисунок 1 – Волоконнообразующее устройство

Таким образом, задача сводится к определению значений скорости в коническом кольцевом канале, обусловленных перепадом давлений на входе и выходе из канала. Для решения поставленной задачи в настоящей работе используются возможности пакета COMSOL multiphysics версии 4.3a, а именно модуль Chemical Engineering, разработанный на основе классических трудов Берда Р., Стюарта В., Лайтфута Е. (Bird, Stewart, Lightfoot) «Явление переноса» (Transport Phenomena) [4]. Методы, реализованные в этом модуле, позволяют моделировать течения жидкости и газа с учетом влияния явлений переноса, т.е. взаимное влияние процессов переноса массы и энергии и кинетики химических реакций. Поставленная задача мо-

жет быть описана уравнением Навье – Стокса [5] с учетом сжимаемости потока при дозвуковых скоростях ($M < 0,3$):

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\zeta \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{i,k} \right),$$

где ρ - плотность;

μ - коэффициент динамической вязкости;

ζ - объемная вязкость.

В качестве начальных условий принято, что температура воздуха равна 293,15 К и не изменяется, начальные значения скорости равны нулю, а давление соответствует атмосферному. Граничные условия: скорость скольжения на стенках принята равной нулю ($u = 0$), избыточное давление на входе – 0,6 атм. ($P_{in} = 60795$ Па), выходе – нуль ($P_{out} = 0$). Геометрия канала создана с использованием системы автоматизированного проектирования и расчета (САПР) Компас 3D v12 и импортирована в COMSOL. Сгенерирована физически обусловленная сетка с уменьшенным (finer) размером областей (рис. 2, 3). Таким образом, общее количество степеней свободы задачи составило 206128. Задача решалась в трехмерной стационарной постановке, использовался итерационный (GMRES) стационарный решатель. Для расчетов использовался персональный компьютер с процессором Intel Core i7-3630QM 2.4 GHz with Turbo Boost up to 3.4 GHz и оперативной памятью 8 GB DDR3, время решения составило 419 с.

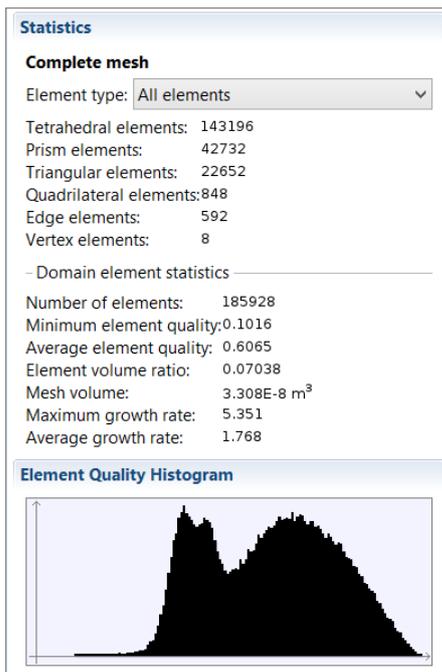


Рисунок 2 – Параметры сетки 3D

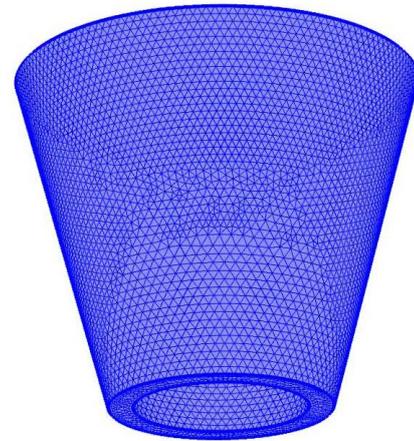


Рисунок 3 – Изображение сетки 3D

При переходе к двумерной осесимметричной постановке также сгенерирована физически обусловленная сетка с предельно мелким (extremely fine) размером элементарных областей (рис. 4). Общее количество степеней свободы задачи составило 40434, использовался прямой (PARDISO) стационарный решатель. С использованием того же компьютера время решения сократилось до 17 с.

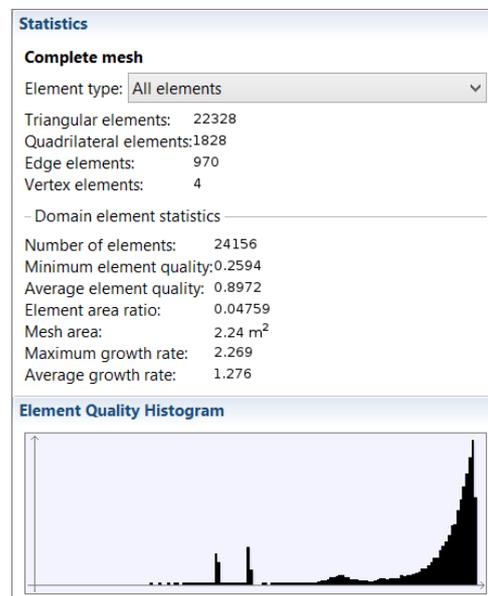


Рисунок 4 – Параметры сетки 2D осесимметричной

Таким образом, определено поле скоростей в сужающемся канале волоконнообразователя (рис. 5). Установлено, что наибольшая скорость потока достигается на выходе из

РАСЧЕТ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ СОПЛЕ ВОЛОКНООБРАЗОВАТЕЛЯ MELT-BLOWN С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА COMSOL

сопла и для заданных исходных данных составляет 299 м/с.

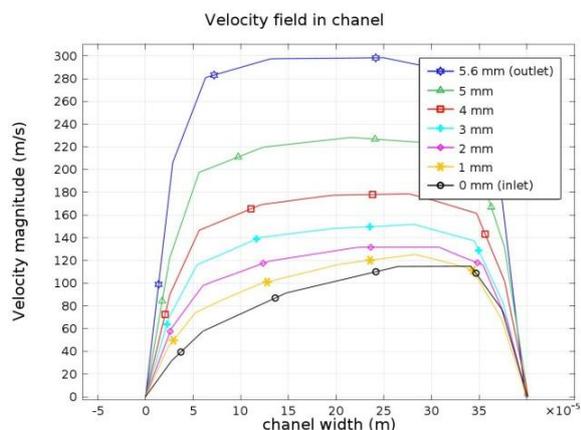


Рисунок 5 – Распределение скоростей в канале

Максимальные значения скорости потока на выходе из канала, а также значения расхода воздуха, установленные в результате решения задачи при различных значениях избыточного давления на входе, приведены на рисунках 6 и 7 соответственно.

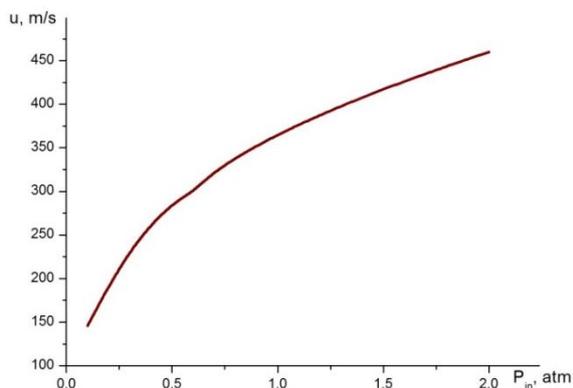


Рисунок 6 – Максимальная скорость в зависимости от давления на входе

Значение скорости при увеличении перепада давлений согласно результатам аппроксимации экспоненциальной функцией вида $u = u_0 + A \cdot \exp(R_0 \cdot P_{in})$ асимптотически стремится к 489,6 м/с, что, видимо, соответствует газодинамическому равновесию.

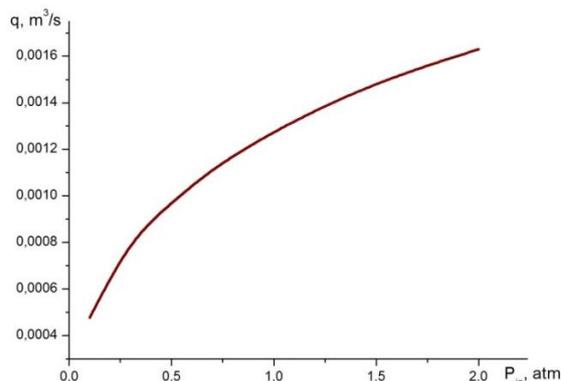


Рисунок 7 – Расход воздуха в зависимости от давления на входе

Результаты математического моделирования демонстрируют, что наибольшая скорость потока достигается на выходе из сопла и при избыточном давлении на входе 0,6 атм. составляет 299 м/с и, при увеличении давления, может быть увеличена до 489,6 м/с.

Решение рассмотренной задачи в осесимметричной постановке позволяет значительно снизить трудоемкость расчетов, обеспечивая тем самым возможность более сложной постановки. Переход от пространственного к плоскому осесимметричному описанию не снижает точности расчетов, т.к. задача геометрически ограничена поверхностями вращения, а возможные неоднородности пренебрежимо малы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Makarevich A.V., Kestelman V.N. Melt Blowing: equipment, technology, and polymer fibrous materials. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002, 212 p.
2. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. СПб: Издание СПГУТД, 2008. - 354 с.
3. David R. Salem Structure Formation in Polymerics. Hanser Verlag, 2001, 578 p.
4. Официальный сайт COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://www.comsol.com/>. - 07.09.2013.
5. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с

Лысак Илья Александрович – к.т.н., доцент, тел.:89528925003, e-mail:h-0-h@yandex.ru; Лысак Галина Владиленовна – к.х.н., доцент